

砾岩油藏裂缝特征及其对开发效果的影响

——以克拉玛依油田八区下乌尔禾组油藏为例

阴国锋¹, 徐怀民¹, 张广群², 陶武龙², 张兵²

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院; 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油股份有限公司新疆油田分公司采油二厂, 新疆克拉玛依 834008

摘要 针对克拉玛依油田八区下乌尔禾组油藏裂缝分布复杂、孔隙度低、非均质性强的特点, 综合岩心、测井、生产动态资料分析油藏裂缝特征、控制因素及其对油藏开发效果的影响, 提出了裂缝型砾岩油藏开发调整的措施建议。首先从岩心及成像测井资料分析入手, 确定了砾岩储层发育的裂缝类型及特征。然后通过分析区域构造演化、应力场变化及沉积岩石类型与裂缝形成的关系, 揭示了裂缝形成的主要控制因素, 确定了裂缝主要走向, 总结了裂缝的分布规律及平面展布形态。最后结合注采井组的生产动态资料, 分析了裂缝对开发效果的影响, 提出了裂缝型砾岩油藏在注采井网调整、加密井设计、注水参数选取等方面的技术政策。分析结果表明, 裂缝的发育程度和分布规律既是油气富集程度和油井产能高低控制因素, 又是导致油藏水淹水窜、高含水开发的主要因素。而采用注采井排与裂缝走向的夹角在 45°左右、低注水量的小井距五点法线状注水的井网方式可以有效提高特低-低渗透裂缝型砾岩油藏的开发效果, 具有一定的应用推广价值。

关键词 砾岩油藏; 裂缝特征; 开发效果; 克拉玛依油田

中图分类号 TE344

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.15.004

Fractures Characteristics of Conglomerate Reservoirs and Their Influence on Development Effectiveness: A Case Study of the Urho Reservoir of NO. 8 District of Karamay Oil Field

YIN Guofeng¹, XU Huaimin¹, ZHANG Guangqun², TAO Wulong², ZHANG Bing²

1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting; College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. No. 2 Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Karamay 834008, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Abstract The Lower Urho reservoir of NO. 8 district of Karamay oil-field is characterized by complicated fracture distribution, low porosity, and strong heterogeneity, etc. In view of these characteristics, by using core, well log, dynamic production data, these contents are analyzed, which are the fracture characteristics, main control factors of fracture formation, and influence on development effectiveness, etc. Development adjustment proposal measures of fracture conglomerate reservoir were put forward based on the fracture research. The concrete steps are as follows: Firstly, the types and characteristics of fracture conglomerate reservoir are defined on the basis of reservoir cores analysis and imaging logging data interpretation. Secondly, the main control factors of fracture formation is revealed, the major fracture strike is determined, and the fracture distribution and plane extension in the oil reservoir are summarized by

收稿日期: 2011-04-06; 修回日期: 2011-04-29

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05001-003)

作者简介: 阴国锋, 博士研究生, 研究方向为油气田开发地质学, 电子信箱: guofengf@126.com; 徐怀民(通信作者), 教授, 研究方向为油藏地质评价、油气开发地质, 电子信箱: xuhuaimin@sina.com

analyzing the relation among regional tectonic evolution, the change of stress fields, and the types of sedimentary and fracture formation. Finally, by combining dynamic production data of injection-production well group, the influence of fracture identification on development effectiveness is analyzed. And technology policies on fractured conglomerate reservoir development are pointed out; the policies effectively apply the fracture research results on the adjustment of injection production well pattern, the adjustment of well design, and selection of injection parameters. The practical results show that both the deliverability of oil well and water flooding, water breakthrough, and high water content in well are controlled by fractures development degree and distribution pattern. And a good spatial disposition relationship between injection production wells and fracture is about 45° . High efficiency development for the low-permeability fractured conglomerate reservoir is obtained by the close spacing development, whose characteristics are low water injection rate, five points well pattern form of law, and linear injection. And they could be certainly applied to other similar reservoirs.

Keywords conglomerate reservoir; fracture characteristics; development effect; Karamay oil field

0 引言

近几十年的油气勘探成果表明,在碎屑岩及碳酸盐岩裂缝性储层中找到的油气储量日益增加。裂缝性油气藏由于孔隙度低、非均质性强且裂缝分布复杂,与孔隙性油气藏有本质区别,使得裂缝性油气藏的开发成为当前公认的难题^[1-2]。20 世纪 50 年代末期以来,随着世界上裂缝性油气藏的不断发现,有关裂缝的研究内容逐渐丰富起来。20 世纪 60—80 年代,国内外学者如 Murray^[3]、王仁等^[4]初步研究了裂缝的定量模型并提出相关的具体方法。20 世纪 90 年代以来,文世鹏^[5]、宋慧珍等^[6]将二维、三维构造应力场数值模拟与地质研究相结合,通过实验和计算相结合的手段,建立了构造裂缝定量预测模型,取得了较好成效,为预测裂缝提供了良好的开端,但对于储层非均质性非常强的裂缝型油气藏来说,预测效果与实际的油藏还有一定差距。随着低渗透裂缝油藏的不断开发,裂缝对生产的影响逐渐显现出来,特别是 20 世纪 90 年代末至今,针对低渗透油藏裂缝的一般特征及相应的渗流规律,国内外学者已做了不少卓有成效的工作^[7-13],并提出了具体裂缝性油藏的井网部署和井网优化方式^[14-16],为指导油田的开发方案的制定提供了有力的支持,但这些工作大都是针对具体的砂岩油藏进行,对砾岩油藏的裂缝特征及其对注水开发效果影响的研究甚少。

砾岩裂缝型油藏由于其发育于多种沉积环境、强烈的储层非均质性等特征,致使油气储集空间类型和渗流物理特征异常复杂,在开发中遇到许多难题。克拉玛依油田八区中二叠统下乌尔禾组油藏位于准噶尔盆地西北缘克乌逆掩断裂带南白碱滩断裂下盘(图 1)。储层岩性以砂质小砾岩、不等粒砾岩为主,属于扇三角洲—山麓洪积相的砂砾岩复合体,平均沉积厚度 450m,最厚达 800m。克拉玛依油田八区下乌尔禾组

属于典型的裂缝型低渗透砾岩油藏,油藏于 1979 年投入注水开发,截至目前已进行了 3 轮次的加密调整,但开发中仍存在许多问题,如注水开发时极易沿裂缝发生水淹、水窜,导致开发效果变差,平面上水驱效果不均匀。为提高油井的见效程度及储量的动用程度,降低裂缝对注水的负面影响,需要在充分认识砾岩油藏裂缝特征的基础上,开展裂缝对开发效果的影响研究。因此,开展和加强裂缝型砾岩油藏精细研究对于油田在中高含水期的增储上产、稳油控水工作,不但具有重要的研究意义和经济价值,而且具有深远的社会效益。



图 1 准噶尔盆地西北缘八区二叠系下乌尔禾组地理位置构造

Fig. 1 Location of Lower Urho reservoir of NO. 8 district of Karamay oil field in northwestern Junggar Basin

1 裂缝特征及其控制因素

1.1 裂缝类型及基本特征

克拉玛依油田八区下乌尔禾组油藏天然裂缝的类型有构造垂直缝、构造高角度缝、构造低角度缝和成岩充填缝—半充填缝等,以构造高角度缝为主(图 2)。灰一段—灰五段均有分布,裂缝发育段厚度与地层厚度的百分比约为 1.45%—10.46%(表 1)。

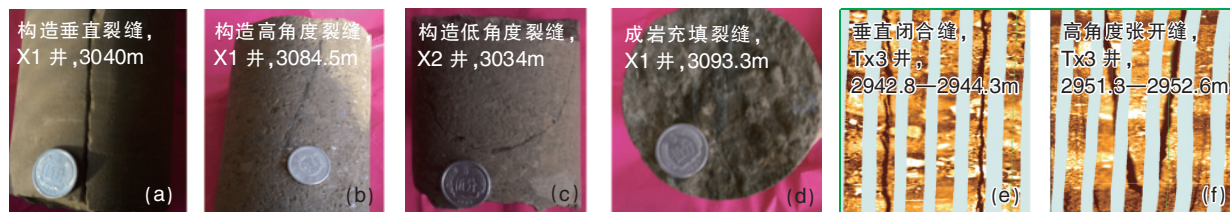


图 2 下乌尔禾组储层天然裂缝发育特征

Fig. 2 Development characteristics of natural fracture for Lower Urho reservoir

表 1 下乌尔禾组不同类型裂缝发育规模

Table 1 Development scale of different types of fractures for Lower Urho reservoir

井号	天然裂缝与 地层厚度 百分比/%	钻井诱导缝与 地层厚度 百分比/%	天然裂缝 连续最大 厚度/m	钻井诱导缝 连续最大 厚度/m
Tx1	4.46	27.44	2.30	32.80
Tx2	10.46	3.46	8.80	3.50
Tx3	1.45	33.85	3.20	39.70
Tx4	5.00	9.06	2.50	25.40

各类裂缝在原始地层条件下多呈闭合状态,少数为充填或半充填缝。人工压裂前,裂缝的渗流能力较差,压裂过程中各类闭合缝、充填或半充填缝会优先张开,形成压裂裂缝,使渗流能力大为改善。

1.2 裂缝形成的控制因素

八区下乌尔禾组砾岩油藏天然裂缝形成的控制因素主要是构造因素,而非构造因素引起的裂缝主要表现为钻井诱导缝及人工压裂缝。构造裂缝的形成主要受控于外因和内因两个方面。

(1) 从外因上来说,区域地质的构造运动控制了砾岩油藏裂缝的宏观分布规律。准噶尔盆地西北缘二叠纪的构造运动以海西晚期构造运动为主,强烈的逆冲推覆运动造成的剧烈挤压作用使沉积物沿断裂扭动。三叠纪末,盆地整体抬升遭受剥蚀,盆地西北缘承受了一定的挤压、扭压应力,形成了一系列冲断、褶皱、不整合及超覆等构造组合^[17-18]。

从主压应力方向来看,准噶尔盆地西北缘二叠纪以来两次应力场变化对该区的裂缝形成产生重要影响(图3),一次是二叠纪晚期—三叠纪强烈的左旋压扭性应力场,在克百断裂带形成多方向的断裂相互交织的现象,是下乌尔禾组裂缝的初次形成期;另一次是侏罗纪时期,克百地区主压应力方向为北西—南东向,同时叠加了右旋应力场作用,形变最强烈,主断裂上盘发育了多条断裂,是下乌尔禾组裂缝的又一

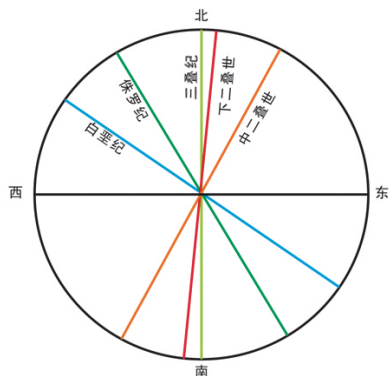


图 3 克百地区二叠纪以来最大主压应力轴方位变化
Fig. 3 Azimuth change of maximum principal stress axis in karamay-Baikouquan Area since the Permian

形成期。在断裂带附近的裂缝多为两条或两条以上主要裂缝,裂缝与断层的夹角近似垂直或小角度斜交,裂缝的延伸长度相对较短,裂缝的走向随着断裂走向变化而发生变化。应用钻井诱导缝的微电阻率扫描(EMI)成像测井资料,确定了八区下乌尔禾组现今最大的主应力方向为北东东—南西西向及裂缝走向(图4)。综上,八区下乌尔禾油藏裂缝发育的主要方向为北东向和东西向。

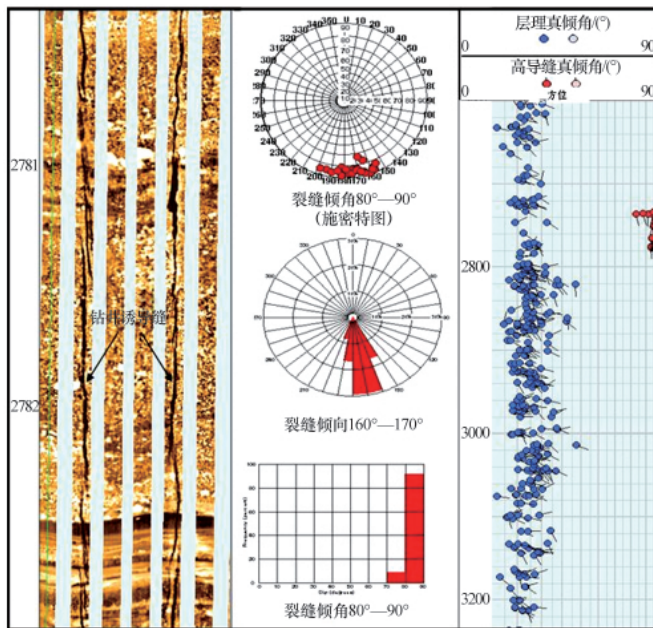


图 4 克拉玛依油田八区下乌尔禾组地层裂缝
走向识别特征

Fig. 4 Characteristics of fracture strike of Lower Urho reservoir of No. 8 district of Karamay oil field

(2) 从内因上来说,储层岩性及岩性组合的属性控制了砾岩油藏裂缝的微观分布模式。脆性组分(包括颗粒与胶结物)含量的高低及成岩作用的强弱是岩石破裂难易程度以及裂缝密度高低的重要因素。脆性组分越多,成岩作用越强,岩石的强度和弹性模量会越大,岩石越容易破裂,也就是说较小的应变就会产生裂缝。八区下乌尔禾组裂缝发育程度与岩性的关系非常密切,裂缝最为发育的岩性是砂质细砾岩和砂砾岩(图5),不仅发育有裂缝,而且裂缝的密度相当大,其次

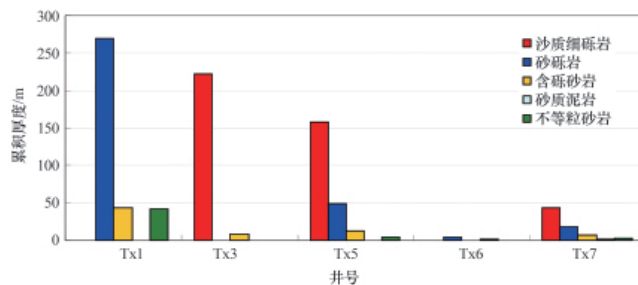


图 5 下乌尔禾组裂缝发育段累积厚度与岩性关系
Fig. 5 Relationship between lithology and thickness of fracture for Lower Urho reservoir



是含砾砂岩和不等粒砂岩,几乎不发育裂缝的是粗砾岩和中砾岩。这主要是因为砂砾岩中含有脆性大的石英,在外因主应力的挤压下,砂砾岩极易发生破裂,形成裂缝。因此,砂砾岩特殊的岩石颗粒组成结构和内部颗粒岩石特征决定了其岩石力学属性,在构造应力的作用下容易破裂。砂质细砾岩与砂砾岩在八区下乌尔禾组地层的广泛分布,是造成裂缝大面积区域性分布的重要原因之一。

2 裂缝型砾岩储层基本渗流特征对开发效果的影响

2.1 裂缝型砾岩储层基本渗流特征

裂缝性油藏一般为双重介质油藏,即储层是在岩石具有相当有效孔隙的背景下被各种裂缝切割而成,基岩孔隙作为主要储集空间,裂缝作为主要渗滤通道,存在孔隙度、渗透率完全不同的两类储集空间。从渗流特征来看,可分为裂缝和基质两大系统,裂缝系统主要是由宽度较大的裂缝及与之相连通的孔洞构成的网络系统;基质系统是由被裂缝切割、大小不等的岩块组成,基质岩块的储集空间主要为粒间孔隙及与之相连的微细裂缝。裂缝系统和基质系统是共存于裂缝性油藏的两个相互联系、相互制约的裂缝孔隙网络系统,其中裂缝系统属于高渗高产高效渗流系统,基质系统属于低渗低产低效渗流系统^[11]。

裂缝性油藏水驱开采过程中的主要驱油动力是注水压力梯度、毛管力和重力。对裂缝系统和基质系统来讲,这3种驱动力的作用不同。裂缝系统注水采油时主要靠注水驱动压力梯度排油,如果垂直裂缝发育,重力也起重要作用。对于基质系统,其注水驱替对象为基质细小孔隙及微小缝洞中的原油,注水采油时主要依靠毛管力作用使裂缝中的水进入基质渗吸排油;其次是裂缝系统和岩块系统之间的流动压力梯度作用驱油;此外,重力作用也可能起到一定作用,如果基质岩块较小,其作用比较弱。

当基质为非润湿相(油)所饱和,而裂缝为润湿相(水)所饱和时,如果毛管压力、重力、注入压力有利于基质中润湿相(水)的驱替,即发生渗吸过程,就会降低非润湿相(油)的饱

和度。研究表明,八区下乌尔禾油藏储层的渗吸能力较弱,水驱是采油的主要技术,渗吸是补充^[9]。

2.2 裂缝发育情况对开发效果影响

克拉玛依八区下乌尔禾组油藏多年来的开发经验表明,裂缝是影响开发效果的主要因素之一。油层裂缝有双重作用,一方面容易使注入水沿裂缝窜进,造成生产井过早见水,甚至造成暴性水淹;另一方面裂缝可以提高注水井的吸水能力和采油井的生产能力。合理的井网与裂缝的配置,可以充分发挥和利用裂缝的有利作用,尽可能减小和避免裂缝的不利影响。

由于裂缝的存在,八区下乌尔禾油藏在开采的过程中表现出注入水淹裂缝突进,出现裂缝水窜和见水不见效的特点。通过对研究区油井动态分析发现,裂缝水窜井和含水陡升井(含水率在几个月内突升至80%以上,产油量迅速下降)表现了注入水在储层中的沿裂缝的突进。其中出现裂缝水窜的井平均日产液量可达55.85t/d,而含水陡升井的平均日产液量也达25.1t/d,明显高于其余油井。对47口井的来水方向统计分析(表2)可以看出,来水方向以北东—南西向和东—西向为主,两者总计占74.5%,这也正是裂缝发育的主方向。

表2 八区下乌尔禾油藏注水裂缝走向统计

Table 2 Statistics data of fracture strike of injection of Lower Urho reservoir of No. 8 district

来水方向	裂缝水窜井数	含水陡升井数	井数	百分比/%
北东—南西	10	12	22	46.8
北西—南东	3	4	7	14.9
东—西	8	5	13	27.7
南—北	5	0	5	10.6
总计	26	21	47	100

根据油井产油、产水及压力变化等特点并排除工程因素,对油井的见水见效特征进行总结分类,并在裂缝发育情况研究基础上,统计油井不同生产状况的裂缝发育特征(表3),结

表3 油井不同生产状况的裂缝发育特征统计

Table 3 Degree of fracture development for different types of oil production status

油井生产状况		裂缝发育情况					发育好—较好 所占比例/%
		发育好 (高角度缝)	发育较好 (低角度缝)	发育差(微裂缝 或半充填缝)	不发育	总计	
未见水 未见效	稳定型	1	14	33	8	56	26.79
	不稳型	—	24	48	10	82	29.27
	低能关型	—	—	2	3	5	0
见水未见效 (注入水)	含水缓慢上升型	3	18	40	5	66	31.82
	含水不稳定型	—	7	23	3	33	21.21
	含水快速上升型	3	31	44	5	83	40.96
见效未见水		1	18	19	4	42	45.24
裂缝水窜		2	9	9	—	20	55.00
见地层水		3	17	45	7	72	27.78

果表明:①未见水未见效井的裂缝发育程度较差,较为发育的高角度缝及低角度缝所占的比例较低,其中低能关型油井的裂缝发育程度最差;②裂缝水窜、含水快速上升的井裂缝发育比例高于其他类型井的裂缝发育程度;③见效未见水井、含水缓慢上升井的裂缝发育较好,裂缝发育比例大多高于30%,生产情况最好的见效未见水井,前两类裂缝的比例达到45.24%,裂缝大大提高了注水井的吸水能力和采油井的生产能力。

而在开发实践中,合理调整注采井排走向与裂缝走向是较好的利用裂缝提高注入水波及体积及开发效果的有效途径。为适应裂缝性油藏的地质特点,提高油藏的开发效果,在八区下乌尔禾组 256 下盘实施小井距注水试验区,通过将原有的反九点法井网形式调整为五点法线状注水井网,调整注采井排方向与裂缝走向呈 45° 左右,注水井排与裂缝走向平行,降低水井配注量等措施,试验区的压力有所回升并趋于稳定,地层压力保持程度为 70%,在总的注水量下降的情况下,油井的产液量得以增加,有效地驱替基质中的原油并防止了注入水窜流,取得了很好的实施效果(图 6)。而对比全区

其他井网形式,小井距的开发效果明显(表4)。这是由于当注采井排与裂缝走向呈 45° 角,注入水沿裂缝进入基质,从而使基质中的原油得到有效驱替,而又因注采井间没有裂缝的直接沟通,采油井见水时间长,生产稳定,受效明显,表现为见效未见水。而行列式注采井排的方向与裂缝走向垂直,注入水沿裂缝流向垂直与注采井排的方向,使得采油井无法受效,低产能,压力保持程度低,表现为未见水未见效。在反九点法井网形式中,由于采油井存在角井、边井的位置不同,注采井排与裂缝走向存在3个夹角,与裂缝走向平行的采油井见水快、表现为见水未见效或裂缝水窜;与裂缝走向垂直的采油井难以受注入水波及,受效差,生产不稳定,表现为未见水未见效;与裂缝走向呈 45° 夹角的注采井排,注入水虽然可以沿裂缝进入基质,但是由于注采井距大(295m),注采压差大,采油井处于角井位置,造成采油井生产不稳定,表现为未见水未见效。从小井距试验区的成功实施及与其他井网的对比可以看出,井网与裂缝的合理空间配置关系是提高特低渗透裂缝型砾岩油藏开发效果的有效途径,小井距线状注水的井网方式可广泛应用于同类其他油藏。

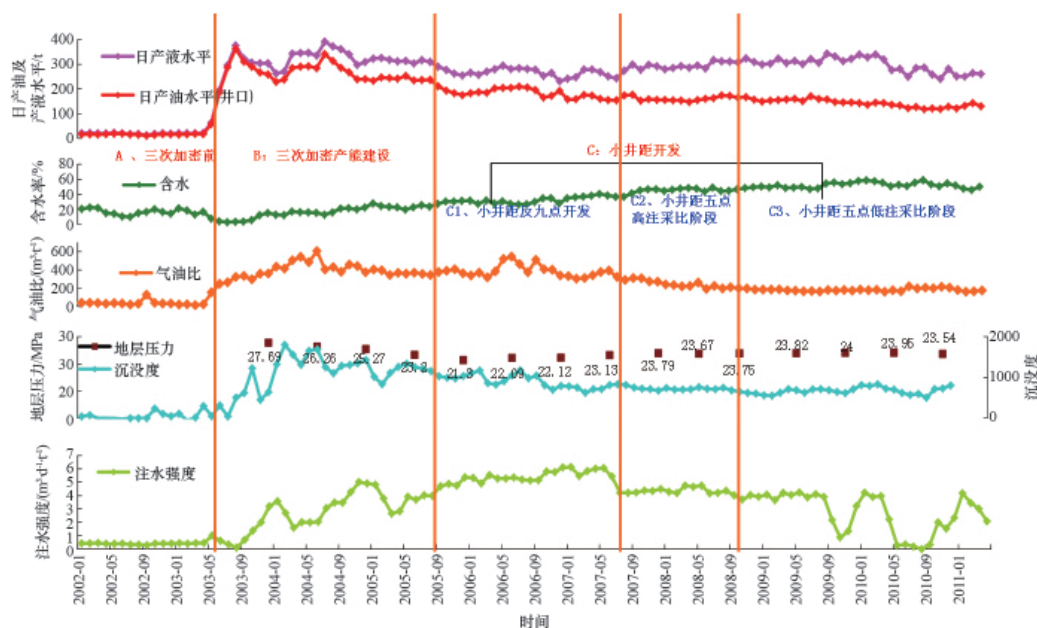


图6 八区下乌尔禾组油藏小井距试验区开发特征曲线

Fig. 6 Feature curve of close spacing development of Lower Urho reservoir of No. 8 district

表 4 八区下乌尔禾组油藏小井距试验区与其他井区实施效果对比

Table 4 Development effect of close spacing and other well blocks in Lower Urho reservoir of No. 8 district in Karamay oil field

对比项目	小井距中心试验区	行列式注水试验区	全油藏
井网	小井距五点法井网	行列式井网	反九点法井网
与裂缝走向夹角/(°)	45	90	0,45,90
平均日注水量/(m ³ ·d ⁻¹)	28.9	53.3	53.59
日产液水平/(m ³ ·d ⁻¹)	8.71	8.15	8.28
平均单井日产油/t	5.18	3.87	4.12
平均单井含水率/%	40.52	52.46	50.21
平均月注采比	4.26	3.24	3.01

3 结论

(1) 八区下乌尔禾组地层天然裂缝的主要类型有构造垂直缝、构造高角度缝、构造低角度缝和成岩充填-半充填缝,以构造高角度缝为主;钻井诱导裂缝有诱导垂直缝、诱导高角度缝和诱导羽状缝,以诱导羽状缝为主。各类裂缝多为闭合缝,呈闭合状态,压裂后开启,使地层渗流能力明显改善。

(2) 二叠纪以来频繁的区域应力场变化及复杂的断裂体系控制了下乌尔禾组裂缝分布规律,而构造运动是造成应力场变化和断裂体系形成的最主要原因,这3者共同构成了裂缝形成的主要控制因素。裂缝的发育程度与岩石岩性及其成岩作用关系密切,裂缝最为发育的是砂质细砾岩和砂砾岩,最易发生应力集中和应变能量最大的砂质细砾岩与砂砾岩在八区下乌尔禾组地层的广泛分布,是大面积裂缝分布的重要原因之一。

(3) 裂缝型砾岩油藏为双重介质油藏,存在裂缝渗流和基质渗流两个系统。裂缝构成了流体的主要储集空间和渗流通道,裂缝的发育程度和分布规律控制了油气富集程度和油井产能高低,裂缝是导致油藏水淹水窜、高含水开发的主要因素。

(4) 注采井排与裂缝走向的夹角在 45° 左右,是较为合理的井网与裂缝的空间配置关系,这种配置关系可以充分发挥和利用裂缝的有利作用,尽可能减小和避免裂缝的不利影响。采用低注水量的五点法线状注水的井网方式是提高特低-低渗透裂缝型砾岩油藏开发效果的有效途径之一。

参考文献 (References)

- [1] 袁士义, 冉启全, 胡永乐, 等. 火成岩裂缝性稠油油藏有效开发方式[J]. 石油学报, 2005, 26(4): 63-68.
Yuan Shiyi, Ran Qiquan, Hu Yongle, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(4): 63-68.
- [2] 戴金星. 油气地质学的若干问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 710-717.
Dai Jinxing. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(5): 710-717.
- [3] Murray G H. Quantitative fracture study, Sanish pool, Mckenzie county, North Dakota[J]. *AAPG Bulletin*, 1968, 52(1): 57-65.
- [4] 王仁, 丁中一, 殷有泉. 固体力学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1979.
Wang Ren, Ding Zhongyi, Yin Youquan. *Solid mechanics foundation*[M]. Beijing: Geology Publishing House, 1979.
- [5] 文世鹏, 李德同. 储层构造裂缝数值模拟技术[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1996, 20(5): 17-24.
Wen Shipeng, Li Detong. *Journal of the University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 1996, 20(5): 17-24.
- [6] 宋惠珍, 曾海容, 孙君秀, 等. 储层古应力场数值模拟 [J]. 地震地质, 1999, 21(3): 193-204.
Song Huizhen, Zeng Hairong, Sun Junxiu, et al. *Seismology*, 1999, 21(3): 193-204.
- [7] 曾联波, 郑聪斌. 陕甘宁盆地靖安地区区域裂缝及对开发的影响[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 1999, 14(1): 16-18.

- Zeng Lianbo, Zheng Congbin. *Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition*, 1999, 14(1): 16-18.
- [8] 曾联波. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征 [J]. 地质科学, 2004, 39(1): 11-17.
Zeng Lianbo. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(1): 11-17.
- [9] 刘洪涛, 曾联波, 房宝才, 等. 裂缝对大庆台肇地区低渗透砂岩储层注水的影响[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(4): 68-72.
Liu Hongtao, Zeng Lianbo, Fang Baocai, et al. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences*, 2005, 29(4): 68-72.
- [10] 周新桂, 操成杰, 袁嘉音, 等. 油气盆地储层构造裂缝定量预测研究方法及其应用[J]. 吉林大学学报: 自然科学版, 2004, 34(1): 79-84.
Zhou Xingui, Cao Chengjie, Yuan Jiayin, et al. *Journal of Jilin University: Science Edition*, 2004, 34(1): 79-84.
- [11] 孙庆和, 何玺, 李长禄. 特低渗透储层微缝特征及对注水开发效果的影响[J]. 石油学报, 2000, 21(4): 52-57.
Sun Qinghe, He Xi, Li Changlu. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(4): 52-57.
- [12] 梁官忠, 王群超, 夏欣, 等. 阿北安山岩油藏裂缝发育特征对开发的影响[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 64-72.
Liang Guanzhong, Wang Qunchao, Xia Xin, et al. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(2): 64-72.
- [13] 李道品. 低渗透油田高效开发决策论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 35-48.
Li Daopin. *The development decision-making theory of the low permeability oil field*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 35-48.
- [14] 刘子良, 魏兆胜, 陈文龙, 等. 裂缝性低渗透砂岩油田合理注采井网 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(4): 85-88.
Liu Ziliang, Wei Zhaosheng, Chen Wenlong, et al. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(4): 85-88.
- [15] 邓明胜, 汪福成, 迟田立, 等. 朝阳沟裂缝性低渗透油田井网适应性研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(6): 27-30.
Deng Mingsheng, Wang Fucheng, Chi Tianli, et al. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2003, 22(6): 27-30.
- [16] 于银华, 喻高明. 裂缝性砂岩特低渗油藏合理井网研究[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(4): 332-335.
Yu Yinhua, Yu Gaoming. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2006, 28(4): 332-335.
- [17] 蔚远江, 何登发, 雷振宇, 等. 准噶尔盆地西北缘前陆冲断带二叠纪逆冲断裂活动的沉积响应[J]. 地质学报, 2004, 78(5): 612-624.
Wei Yuanjiang, He Dengfa, Lei Zhenyu, et al. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(5): 612-624.
- [18] 蔚远江, 胡素云, 雷振宇, 等. 准噶尔西北缘前陆冲断带三叠纪-侏罗纪逆冲断裂活动的沉积响应[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 424-437.
Wei Yuanjiang, Hu Suyun, Lei Zhenyu, et al. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 424-437.
- [19] 喻克全, 熊伟, 覃建华, 等. 低渗透砾岩储层渗流机理研究 [R]. 克拉玛依: 中国石油新疆油田分公司公司勘探开发研究院, 2008.
Yu Kequan, Xiong Wei, Qin Jianhua, et al. *Research on percolation mechanism of low permeability conglomerate reservoirs* [R]. Karamay: Exploration and Development Research Institute, Xinjiang Oilfield, PetroChina, 2008.

(责任编辑 刘志远)