

人工裂缝与天然裂缝耦合关系及其开发意义

万晓龙¹, 高春宁², 王永康¹, 张振红², 闫海龙¹, 安明胜¹

(1. 长庆油田公司超低渗透油藏开发部, 西安 710021; 2. 长庆油田公司勘探开发研究院, 西安 710021)

摘要:通过野外露头、成像测井、古地磁定向岩心以及岩石差应变测试等资料,对鄂尔多斯盆地延长组超低渗储集层天然裂缝的发育特征进行了系统研究,并结合微地震监测资料,对压裂缝展布规律及其与现今地应力和天然裂缝的关系进行了分析。人工压裂缝与天然裂缝具有较好的耦合作用,在陕北地区,由于天然裂缝发育,岩石的不均一性使得人工压裂缝主要沿着天然缝扩展;而在陇东地区,天然裂缝的发育程度相对较差,压裂缝的延伸方向及其形态主要受现今地应力的控制。因此,超低渗油田的开发井网部署时,既要考虑天然裂缝的发育程度,还应该考虑天然裂缝方位与地应力的匹配关系。

关键词:天然裂缝;人工裂缝;地应力;耦合作用;开发意义

中图分类号: TU459+.4

文献标识码: A

0 引言

特低渗透储集层由于岩性致密,通常没有自然产能,必须进行人工压裂改造才能获得较高的初期产能。注水开发保持地层能量,是目前实现油田稳产的有效手段之一。而这类储集层通常裂缝发育,裂缝提高了储集层的渗透性,尤其是基质渗透率小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的超低渗透储集层,裂缝是储集层中油气运移和流体渗流的主要通道,同时可能导致注水开发过程中油井水淹。目前为低渗透油田开发而进行的储集层裂缝的研究,主要集中在两个方面:一是天然裂缝的分布特征、形成机制及其发育规律的研究^[1-10];二是人工压裂缝的研究,包括压裂施工参数的优化及压裂裂缝与现今地应力的最大主应力关系的研究^[11-16]。而在天然裂缝对人工压裂缝的控制作用方面的研究较少^[17]。本文以陕北沿河湾长₆、陇东长₈—长₆为例,从野外露头、岩心、成像测井等方面对鄂尔多斯盆地长₆、长₈超低渗天然裂缝发育特征进行了研究,结合微地震监测结果,对人工裂缝与天然裂缝和现今地应力的最大主应力的关系进行了分析,并对其开发意义进行了探讨。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地中生界上三叠统延长组是一套以大型内陆凹陷盆地为背景,以河流和湖泊

收稿日期: 2009-03-19

作者简介: 万晓龙 (1978-), 男, 江苏海安人, 开发地质工程师, 主要从事油田开发研究及管理工作。地址: 陕西西安经济技术开发区凤城四路苏里格大厦 1803, 邮编 710021。E-mail: wanxl_cq@petrochina.com.cn

两个区块受盆地构造运动共同作用，露头裂缝特点基本一致，但沿河湾地区较陇东地区裂缝发育程度高，裂缝密度大。

2.2 岩心裂缝特征

通过现场岩心观察，对天然裂缝几何形态及发育程度进行了研究，并利用古地磁岩心定向技术，对岩心的天然裂缝方位进行了确定。

根据沿河湾长₆储集层岩心观测，该区所有观测井均不同程度上发育天然裂缝，但裂缝发育程度有明显差异。相对沿河湾而言，陇东长₈、长₆储集层虽然在多数取心井见有天然裂缝，但天然裂缝发育程度相对较差。两个区块岩心观察到的天然裂缝与野外露头观察结果一致，均以高角度裂缝为主，沿河湾岩心高角度裂缝、斜交裂缝和低角度裂缝所占比例分别为 48.3%、32.9% 和 18.8%。

沿河湾地区长₆岩心裂缝的开度主要分布在 0 ~ 0.3 mm 之间，约占 70%，而开度为 0.5 ~ 1.0 mm 的裂缝约占 12%。陇东地区长₈、长₆岩心裂缝开度以 0.04 ~ 0.1 mm 为主。

岩心裂缝定向研究表明沿河湾地区长₆岩心裂缝与延河剖面裂缝系统观察结果相似，以近 EW 向和 SN 向裂缝为主。陇东长₈、长₆储集层裂缝 NE 55° ~ 60° 最发育，其次为 NW 向裂缝，成像测井解释结果表明该区天然裂缝走向也以 NE 55° ~ 65° 为主（见图 2）。

整体上，两个区块岩心均以高角度天然裂缝为主，裂缝主要受构造作用的控制，发育 NE 和 NW 两组裂缝系统。比较而言，沿河湾地区天然裂缝发育，裂缝开度也较大。

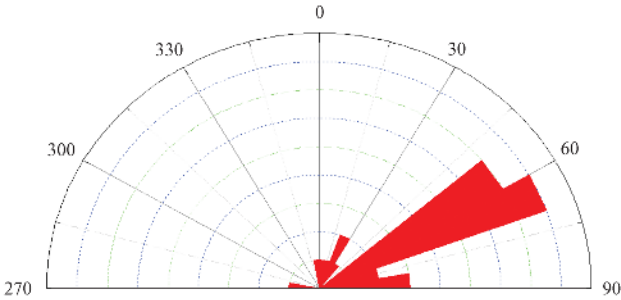


图 2 FMI 解释的裂缝方位图（8 口井）
Fig.2 Natural fractures' azimuth according to FMI data

3 现今地应力的最大主应力方向

现今地应力方向主要是应用岩石差应变实验、钻孔崩落法、人工诱导缝等方法来确定的。

3.1 沿河湾地区

无天然裂缝岩心由于在地下所受三向主应力数值不等，卸载程度也不同，原应力产生了与卸载程度成比例的微裂隙应变。当重新用等围压加载时，不同方向的恢复应变也有所不同，具有最大应变值的方向即是岩心原来受到的最大主应力方向。因此，利用古地磁方法确定岩心在地下自然方位后，采用差应变实验可以确定岩石在地下最大主应力方向。

对沿河湾沿 12、沿 46 井两个岩样进行了差应变测试，测试结果表明沿河湾长₆现今最大主应力方位介于 NE 68° ~ 76° 之间（见表 1）。

3.2 陇东地区

在钻井过程中，由于水平主应力的不平衡性造成井壁总是在最小主应力方向上崩落，在最大主应力方向上不崩落，因此钻井井眼总是成椭圆形，其长轴与最小水平主应力方向一

表 1 沿河湾地区差应变实验数据表

Table 1 Experimental data on the difference in stress variation of Yanhewan district

井号	层位	古地磁样品号	温度段/ ℃	地理坐标		误差 α_{95}	地理坐标平均 方位 $D/ (^{\circ})$	差应变测试 标志线夹角/ $(^{\circ})$	最大主应力 方向
				$D/ (^{\circ})$	$I/ (^{\circ})$				
沿 12	长 ₆	G-2A	NRM ~ 220	356.2	27.0	12.6	342.7	- 59	N76°E
		G-2B	NRM ~ 260	338.6	35.4	9.9			
		G-2C	100 ~ 260	330.3	38.0	4.6			
		G-2D	NRM ~ 260	344.1	37.2	8.1			
沿 46	长 ₆	G-4A	100 ~ 180	11.3		7.3	12.1	- 80	N68°E
		G-4B	NRM ~ 140	29.6	30.2	9.9			
		G-4C	NRM ~ 140	349.2	42.9	7.1			
		G-4D	100 ~ 180	35.9	36.6	3.9			

注：NRM 表示正常室温。

致。通过地层倾角测井（双井径）可将井眼椭圆刻画出来，从而可用钻孔崩落法测试现今主应力方向^[18~20]。根据庄 53 井钻孔崩落法测试结果，该区现今应力最小方向 NW 10°，即最大主应力方向为 NE 80°（见图 3a）。此外通过对庄 111 井人工诱导缝的测试，也表明陇东地区现今最大主应力方向为 NE 75°左右（见图 3b）。

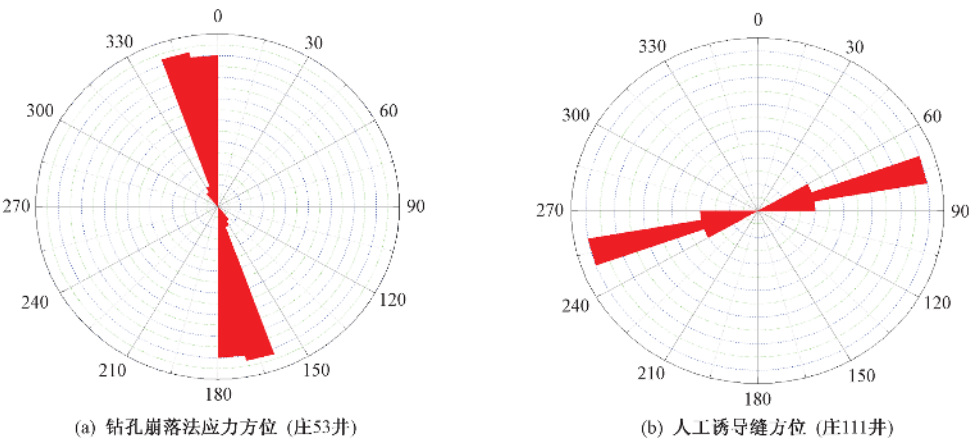


图 3 陇东地区现今地应力场方向

Fig.3 Azimuth of present stress field in eastern Gansu

4 人工裂缝与天然裂缝的耦合作用

低渗储集层由于岩性致密，通常没有自然产能，必须进行人工压裂才能获得较高的产能。目前人工压裂主要采用水力压裂技术对低渗储集层进行改造，而人工压裂缝方位、空间几何形态受到天然裂缝的控制作用。

4.1 沿河湾地区

水力压裂时，迅速升高的井筒射孔位置压力超过岩石抗压强度，岩石形成裂缝，裂缝扩展产生一系列向四周传播的微震波，微震波被监测井周围的监测分站接收到，根据各分站的

接收时差形成方程组，然后求解就可确定微震波空间分布规律，用以描述人工裂缝轮廓，进而给出裂缝的方位、长度、高度、产状及地应力方向等地层参数。

沿 120-17 井长₆层进行了两次分层压裂，微地震监测结果表明沿河湾地区人工裂缝为垂直裂缝，缝长较长（160 ~ 170 m），裂缝方位 85° ~ 90°（见表 2）。

表 2 沿 120-17 井水力压裂裂缝微地震监测结果表

Table 2 Microseismic monitoring on hydraulic fracturing in well Yan 120-17

层位	射孔深度/m	东翼缝长/m	西翼缝长/m	裂缝方位/（°）	裂缝高度/m	产状
长 ₆	921 ~ 926	81.2	86.6	91.2	17.3	垂直
长 ₆	905 ~ 911	95.9	84.6	86.1	12.1	垂直

4.2 陇东地区

井下微地震裂缝测试是目前人工压裂缝监测最可信的技术，测试原理是通过监测裂缝端部岩石的张性破裂和滤失区的微裂隙的剪切滑动造成的微地震信号，得出裂缝空间展布特征。

应用井下微地震技术对陇东 4 口油井实施压裂缝监测，结果表明该区长₈、长₆储集层人工压裂缝以垂直对称缝为主，裂缝方位主要为 NE 75°，受储集层非均质性的控制，人工压裂缝的类型以及缝长差异较大，庄 61-23 井监测结果仅为单翼缝（见表 3）。

表 3 陇东地区长₈、长₆压裂缝井下微地震监测结果表

Table 3 Microseismic monitoring on hydraulic fracturing in Longdong district

井号	层位	方位	类型	产状	缝长/m
庄 61-23	长 ₈	NE 80°	单缝	垂直	420
庄 59 ~ 21	长 ₈	NE 75°	对称缝	垂直	365
庄 85 ~ 22	长 ₆	NE 75°	对称缝	垂直	191
庄 87 ~ 22	长 ₆	NE 74°	对称缝	垂直	213

4.3 耦合作用

沿河湾地区天然裂缝发育，人工压裂缝方向（NE 85° ~ 90°）与天然裂缝方位（NE 85°）基本一致，而与最大主应力方向（NE 65° ~ 75°）存在夹角。陇东地区天然裂缝相对不发育，人工压裂缝方向（NE 75°）与天然裂缝方位（NE 50° ~ 60°）有个明显的夹角，而与最大主应力方向（NE 75°）一致。

通过将陕北沿河湾、陇东地区人工压裂缝方位与天然裂缝及最大主应力对比研究，认为天然裂缝对人工裂缝具有重要的控制作用。油气储集层，特别是特低渗透储集层中，一般发育有 1 ~ 2 组按一定规律分布的天然裂缝，且一般以高角度裂缝为主。在人工压裂造缝时，由于天然裂缝的抗张强度小于岩石的抗张强度，若达到一定条件，天然裂缝会优先张开并相互连通形成压裂缝，使压裂裂缝不再严格地沿着最大主应力方向延伸，并控制压裂裂缝的空间特征。当天然缝相对不发育时，现今最大主应力对人工缝开启方向具有控制作用，压裂裂缝的方向、形态受现今地应力场的特征控制。

5 石油开发意义

人工压裂造缝是特（超）低渗透油田具有产能的重要手段。通常认为在均质性储集层中，人工裂缝的展布方向总是垂直于现今地应力场的最小主应力方向扩展。当超低渗油田裂缝发育时，由于基质和裂缝分布的强烈非均质性，人工裂缝的分布除了受现今地应力场的控制外，还受古构造应力场作用下形成的天然裂缝的控制^[21]。

井网部署时，要充分考虑研究区天然裂缝发育程度、发育方位及其与现今地应力的最大主应力的匹配关系。若研究区天然裂缝发育，人工压裂缝可能沿着天然裂缝方位延展，井排方向部署时主要是要考虑以天然裂缝走向为主；当研究区天然裂缝相对不发育时，人工压裂缝走向可能与最大主应力方向一致，井排方向应以最大主应力方向为主，从而达到油田有效开发，最大限度杜绝油井爆性水淹的目的。如沿河湾地区，其井排方向以 NE 85°为宜；而陇东地区的井排方向以 NE 75°较为适合。因此，充分考虑人工缝与天然缝耦合作用，对超低渗油田注水开发具有重要的意义。

致谢：研究过程中得到中国石油大学（北京）曾联波教授、中国地质科学院周新桂研究员的指导，并提供了相关数据，在此表示衷心的感谢！

参 考 文 献

- [1] 张吉昌, 田国清, 刘建中. 储层构造裂缝的分形分析 [J]. 石油勘探与开发, 1996, 23 (4): 65 ~ 67.
ZHANG Ji-chang, TIAN Guo-qing, LIU Jian-zhong. A fractal analysis on structural fractures of reservoirs [J]. Petroleum Exploration and development, 1996, 23 (4): 65 ~ 67.
- [2] 曾联波. 雷家油田下第三系低渗透储层裂缝特征 [J]. 石油天然气地质, 1996, 20 (2): 167 ~ 169.
ZENG Lian-bo. Fracture characteristics of eogene low-permeable reservoirs in Leijia oilfield. Oil & Gas Geology, 1996, 20 (2): 167 ~ 169.
- [3] 曾联波, 田崇鲁, 刘刚. 松辽盆地南部低渗透砂岩储层裂缝特征及其对油田开发的影响 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 1998, 22 (2): 11 ~ 13.
ZENG Lian-bo, TIAN Chong-lu, LIU Gang. Characteristics of fracture of sandstone reservoir with low permeability in southern songliao basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 1998, 22 (2): 11 ~ 13.
- [4] 孙庆和, 何玺, 李长禄. 特低渗透储层微裂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 Qing-he, HE Xi, LI Chang-lu. The effects of microfractures for development the lowest permeability reservoir in water injection [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21 (4): 52 ~ 57.
- [5] 梁兵, 王焕弟. 储层微裂缝预测技术 [J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38 (4): 400 ~ 404.
LIANG Bing, WANG Huan-di. Prediction of micro-fracture in reservoir [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38 (4): 400 ~ 404.
- [6] 张莉. 陕甘宁盆地储层裂缝特征及形成的构造应力场分析 [J]. 地质科技情报, 2003, 22 (2): 21 ~ 24.
ZHANG Li. Characteristics of reservoir fracture and the analysis of stress field in Shanxi-Gansu-Ningxia basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22 (2): 21 ~ 24.
- [7] 周新桂, 邓宏文, 操成杰, 等. 储层构造裂缝定量预测研究及评价方法 [J]. 地球学报, 2003, 24 (2): 175 ~ 180.
ZHOU Xin-gui, DENG Hong-wen, CAO Cheng-jie, et al. The methods for Quantitative prediction and structural fissures in reservoirs [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24 (2): 175 ~ 180.

- [8] 周新桂, 操成杰, 袁嘉音. 储层构造裂缝定量预测与油气渗流规律研究现状和进展 [J]. 地球科学进展, 2003, 18 (3): 398 ~ 404.
ZHOU Xin-gui, CAO Cheng-jie, YUAN Jia-yin. The research actuality and major progresses on the quantitative forecast of reservoir fractures and hydrocarbon migration law [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18 (3): 398 ~ 404.
- [9] 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 Lian-bo. Fissure and its seepage characteristics in low-permeable sandstone reservoir [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39 (1): 11 ~ 17.
- [10] 邢振辉, 程林松, 周新桂, 等. 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区上古生界致密砂岩气藏天然裂缝形成机理浅析 [J]. 地质力学学报, 2005, 11 (1): 33 ~ 42.
XING Zhen-hui, CHENG Lin-song, ZHOU Xin-gui, et al. Mechanism of natural fracture formation in the upper Paleozoic tight sand gas reservoirs in the tabamiao area north Ordos basin [J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11 (1): 33 ~ 42.
- [11] 王仲茂, 胡江明. 水力压裂形成裂缝形态的研究 [J]. 石油勘探与开发, 1994, 21 (6): 66 ~ 69.
WANG Zhong-mao, HU Jiang-ming. Researching of fracture shapes within the hydraulic fracture [J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21 (6): 66 ~ 69.
- [12] 丁云宏, 陈作, 曾斌, 等. 渗透率各向异性的低渗透油藏开发井网研究 [J]. 石油学报, 2002, 23 (2): 64 ~ 67.
DING Yun-hong, CHEN Zuo, ZENG Bin, et al. The development well-pattern of low and anisotropic permeability reservoir [J]. Acta petrolei sinica, 2002, 23 (2): 64 ~ 67.
- [13] 王振铎, 王晓泉, 陈彦东, 等. 在压裂改造中加深对砂岩储层天然裂缝发育状况的认识 [J]. 钻采工艺, 2002, 25 (3): 24 ~ 28.
WANG Zhen-duo, WANG Xiao-quan, CHEN Yan-dong, et al. the knowledge of natural fracture development status for sandstone reservoir in fracturing transformation [J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25 (3): 24 ~ 28.
- [14] 李民河, 聂振荣, 廖健德, 等. 水力压裂缝延伸方向分析及其应用 [J]. 新疆地质, 2003, 21 (4): 486 ~ 488.
LI Min-he, NI Zhen-rong, LIAO Jian-de, et al. Analysis and application on fracture propagation direction of hydraulic fracturing [J]. Xinjiang Geology, 2003, 21 (4): 486 ~ 488.
- [15] 王江, 王玉英. 水力压裂缝方向对油井含水动态的影响 [J]. 钻采工艺, 2004, 27 (1): 54 ~ 57.
WANG Jiang, WANG Yu-ying. The hydraulic fracture direction on the well water cut behavior [J]. Drilling & Production Technology, 2004, 27 (1): 54 ~ 57.
- [16] 王晓泉, 王振铎, 雷群, 等. 小型压裂与主压裂对比分析及对裂缝垂向延伸规律研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24 (4): 36 ~ 37.
WANG Xiao-quan, WANG Zhen-duo, LEI Qun, et al. comparison of mini-fracturing and main-fracturing and the fracture vertically extending law [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24 (4): 36 ~ 37.
- [17] 李玉喜, 肖淑梅. 储层天然裂缝与压裂缝关系分析 [J]. 特种油气藏, 2000, 7 (3): 26 ~ 29.
LI Yu-xi, XIAO Shu-mei. Relationship between reservoir in situ and fractured fractures [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2000, 7 (3): 26 ~ 29.
- [18] 黄雨蕊, 许忠淮, 高阿甲, 等. 利用钻孔崩落研究原油田的构造应力场 [J]. 地震学报, 1994, 16 (2): 195 ~ 203.
HUANG Yu-rui, XU Zhong-huai, GAO A-jia, et al. Utilization of well bore failure to researching the tectonic stress field in Zhongyuan oilfield [J]. Acta seismologica sinica, 1994, 16 (2): 195 ~ 203.
- [19] 许忠淮, 徐国庆, 吴少武. 东海地区现代构造应力场及其成因探讨 [J]. 地震学报, 1999, 21 (5): 495 ~ 501.
XU Zhong-huai, XU Guo-qing, WU Shao-wu. Modern stress field and generating mechanism in Donghai district [J]. Acta seismologica sinica, 1999, 21 (5): 495 ~ 501.
- [20] 燕金梅, 熊孝云, 王秀芹, 等. 地层倾角测井在二连地区的应用 [J]. 测井技术, 2003, 27 (4): 302 ~ 304, 308.
YAN Jin-mei, XIONG Xiao-yun, WANG Xiu-qin, et al. Applications of dip log in Erlan district [J]. Well Log Technology, 2003, 27 (4): 302 ~ 304, 308.
- [21] 曾联波, 田崇鲁. 构造应力场与低渗透油田开发 [J]. 石油勘探与开发, 1998, 25 (3): 91 ~ 93.
ZENG Lian-bo, TIAN Chong-lu. Tectonic stress oil fields and the development of low permeability oil field [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25 (3): 91 ~ 93.

COUPLED RELATIONSHIP BETWEEN CREATED AND NATURAL FRACTURES AND ITS IMPLICATION TO DEVELOPMENT

WAN Xiao-long¹, GAO Chun-ning², WANG Yong-kang¹, ZHANG Zhen-hong²,
YAN Hai-long¹, AN Ming-sheng¹

(1. *Super-low Permeability Reservoir Development Department, Changqing Oilfield Company, Petrochina, Xi'an 710021, China* ;

2. *Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, Petrochina, Xi'an 710021, China*)

Abstract : According to outcrops, formation microscanner logging (FMI), paleomagnetism oriented cores and stress variation difference experiment, a close study has been made on the natural fractures of super-lower permeability reservoirs in the Yanchang Formation of the Ordos basin, and in combination with microseismic monitoring technique, an analysis carried out on the relationships between created fractures and earth stress and natural fractures. The results show a good coupling between created fractures and natural fractures. In northern Shaanxi, the well-developed natural fractures and heterogeneity of rocks lead the created fractures to stretch mainly along the natural fractures. In eastern Gansu, however, the natural fractures are poorly developed and the crushed fractures are controlled by present stress field. Therefore, in well pattern arrangement of super-low permeability reservoirs, our attention should be paid not only to the growth degree of the natural fractures but also to the orientation of natural fractures and their relation with the present stress field.

Key words : natural fracture ; created fracture ; stress field ; coupled relationship ; development implication