

玛北地区砂砾岩储层地应力方向测井识别及主控因素

付建伟¹,李洪楠¹,孙中春²,王贵文¹,罗兴平²

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;

2. 新疆油田有限责任公司 勘探开发研究院,新疆 克拉玛依 834000)

摘要:准噶尔盆地玛北地区发育致密砂砾岩储层,现今地应力场方向是这类储层压裂改造等需要考虑的关键因素之一,因此开展现今应力场方位分布特征及其主控因素研究具有重要的意义。首先利用地层倾角测井仪极板位置以及微电阻率测井图像信息异常识别井轴形状,其长轴方向代表现今最小水平主应力方向,进而识别出地应力方向;其次,通过微电阻率扫描成像测井识别地应力各向异性引起的诱导缝方位,从而判断地应力方向;最后,利用偶极横波成像测井通过快慢横波速度和方位的拾取,有效识别现今水平地应力方向。在此基础上开展了研究区地应力平面分布特征及主控因素分析,结果表明,玛北地区现今最大水平主应力方向整体表现为东西向;应力场方位主要受控于古构造运动,而局部地区受到断裂活动的影响,现今水平应力场方位会发生不同程度的变化,变化程度与断裂性质、断裂规模等有关。

关键词:地应力方向;测井识别;砂砾岩储层;玛北地区;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Logging identification and controlling factors of present stress orientations of the coarse-grained clastic reservoirs in Mabei region, Juggar Basin

Fu Jianwei¹, Li Hongnan¹, Sun Zhongchun², Wang Guiwen¹, Luo Xingping²

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Xinjiang Oil Company, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: One of the challenges the operators have been facing in fracturing the tight coarse-grained clastic reservoirs in Mabei area of Juggar basin is to identify the orientation of present stress field. This has made the characterization of present stress field orientation and its controlling factors more significant than before. The paper introduces an identification method of the orientation through 1) recognizing of well axis by locating the polar plate of dipmeter and reading micro resistivity image abnormal (the orientation of the long axis represents the direction of the minimum principle stress, which can be used to roughly indicate the orientation of in-situ stress field); 2) determining the orientation of induced fracture in the wall of boreholes by FMI firstly and then identifying the in-situ stress orientation; or 3) using dipole shear imaging log with fast-slow shear velocity and orientation pickup first and then identifying the orientation. Analyses of plane distribution and main controlling factors of stress field in the study area based on the identification shows that the present maximum horizontal principle stress in Mabei is overall in an E-W direction. The present maximum horizontal principle stress field orientations were mainly controlled by the paleotectonic movement. Faulting activities in some part of the region exerted influences over changing of the orientation of the present stress field. The extent of the change is thought to be linked to faulting features and scale.

Key words: stress orientation, logging identification, coarse-grained clastic reservoir, Mabei area, Juggar Basin

地应力是存在于地壳中的内应力,它是由地壳垂直运动和水平运动的力及其他因素的力而引起介质内部单位面积上的作用力^[1]。地应力大小与方向识别对于低渗透油藏的勘探开发具有重要的意义。在工程方

面,对于该类油气藏,往往需要压裂才有产能,井孔的存在导致地应力在井壁发生应力集中,在最大水平主应力方向上应力集中较弱,而在最小水平主应力方向上应力集中最强。人工压裂裂缝面一般垂直于最小主应力方

向。在产能方面,低渗透油藏往往采用水平井技术,并进行压裂投产,当水平井与最小水平主应力方向一致时,则可以形成垂直于水平井井轴的多条人工裂缝,人工裂缝与低角度天然裂缝沟通,提高了油井波及体积,具有较高产能,其井孔稳定性也较好;当水平井与水平最大主应力方向一致时,则只形成平行于水平井井轴的人工裂缝,此时油井波及体积相对变小,其产能降低,井孔稳定性也差。因此,水平井设计时应综合考虑上述情况以及油藏具体特征。另外在注水开发中,沿裂缝线状注水,即井排与裂缝走向一致,这样既避免了油水井发生水窜,又可扩大人工压裂规模,提高油井产能和注水井注水能力,可以改善注水开采效果^[2-6]。

准噶尔盆地中央坳陷玛湖凹陷斜坡带三叠系百口泉组的地层岩性油藏为典型的扇三角洲沉积,储层类型多,主要以砂砾岩为主。地层埋藏较深,物性条件差,为特低孔特低渗储层,在开发过程中大多需要压裂改造才能正常投产。为此进行系统的地应力研究,可为井网部署、套损防治、优化压裂设计等提供依据。

1 地应力各向异性测井表征方法

目前针对现今地应力方向的研究方法较多,主要包括声发射实验法、有限元数值模拟法与微地震测量法,还可利用测井资料、天然地震资料以及天然裂缝走向确定应力场方向。此外,还可以利用构造形迹、活动断裂、位移地物等方法进行现今地应力方向的确定^[7]。

本次研究主要应用测井资料来评价现今最大水平主应力方向,并对其地应力产生的主控因素进行分析,为后期开发以及储层的压裂改造提供参考。

1.1 井壁崩落法确定地应力方向

井壁崩落法是目前确定深部地应力方向的重要方法之一。钻井工作是在地层三向应力状态下进行的,井孔内的应力在钻井过程中得以释放,但井眼周围的应力依然存在。当井眼周围现今最大水平主应力与现今最小水平主应力的差值大于地层中岩石的剪切强度时,压剪破裂会导致井壁产生崩落,形成椭圆形井眼,其长轴方向代表现今最小水平主应力方向^[8]。

1.1.1 井径测井资料识别井壁崩落

当井壁发生崩落,形成椭圆井眼时,井径曲线会表现为其中一条井径曲线增大,另外一条曲线基本不变,第一极板方位基本保持在某一个值附近,变化不大。如图1,可以看出该井3 162~3 182 m多处发生井壁

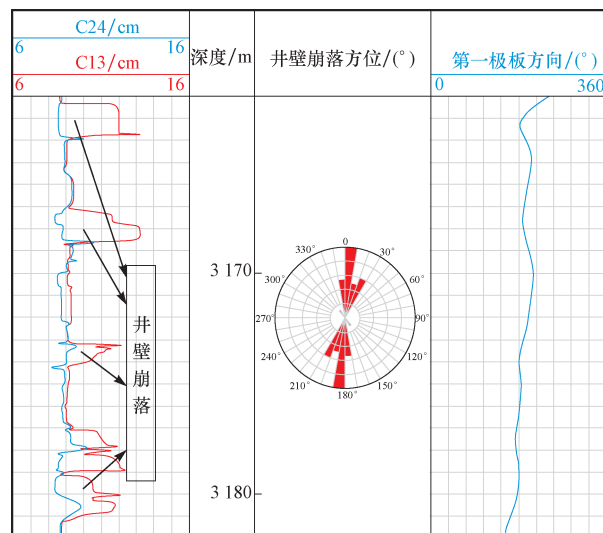


图1 井径曲线显示井壁崩落

Fig. 1 Caliper logging curves showing borehole breakout

崩落,并且崩落处井径曲线均表现为 $C13 > C24$, 椭圆井眼长轴方位为一、三极板方位,即第一极板方位就是井壁崩落方位。这一井段内崩落方位为近南北向,进而判断这一井段内现今最大水平主应力方位为 E-W 向。

1.1.2 成像测井资料识别井壁崩落

FMI 图像可以清楚地指示出应力崩落井段的方位,而且很容易区分其它井壁垮塌,可有效减少错判最小主应力方向的机率。如图2所示,在井壁崩落部分,由于井壁发生应力崩落导致 FMI 极板与井壁接触不好,故会在成像图上出现呈 180° 对称的暗色条带^[8]。在成像图上拾取井壁崩落的方位进行统计,其优势方位代表现今最小水平主应力方向,现今最大水平主应力方向与之垂直。

1.2 成像测井诱导缝法识别地应力方向

诱导缝是钻井过程中产生的裂缝,与地应力有关的诱导缝主要有重泥浆压裂缝和应力释放缝两种,这两种裂缝会沿着现今最大水平主应力方向呈对称或雁列式排列。

如图3所示,重泥浆压裂缝一般平行于井轴纵向延伸,成对出现,且呈 180° 对称分布,其走向就是最大水平主应力方向^[9]。应力释放缝是在钻井过程中,井孔内的应力得以释放而形成的一组裂缝,在成像图上多表现为雁列式排列的裂缝组系(图4),其走向代表现今最大水平主应力方向。

1.3 快慢横波方位法识别地应力方向

当一横波信号入射到各向异性地层时,如果横波的质点振动方向与最大主应力成一定角度,则入射横

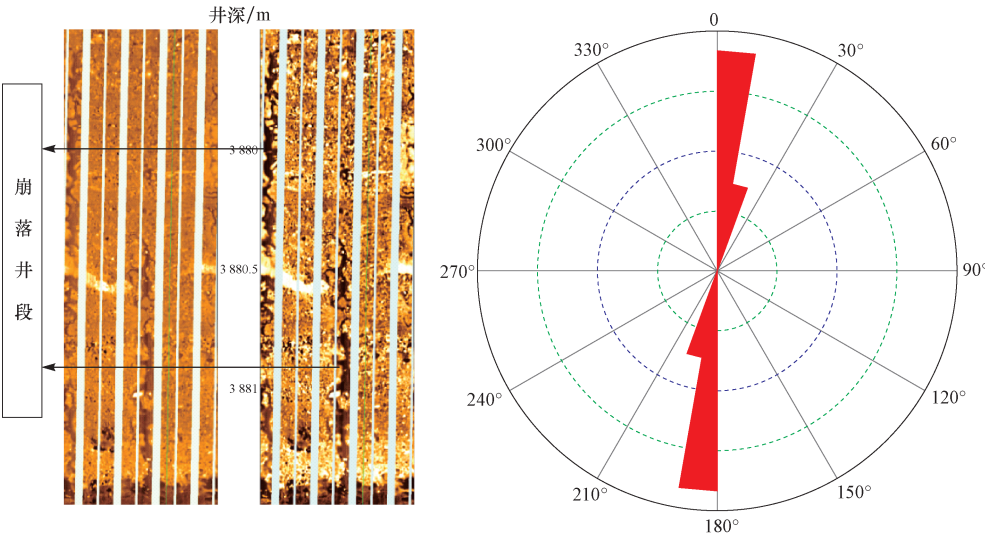


图 2 成像测井指示井壁崩落
Fig. 2 Image of borehole breakout

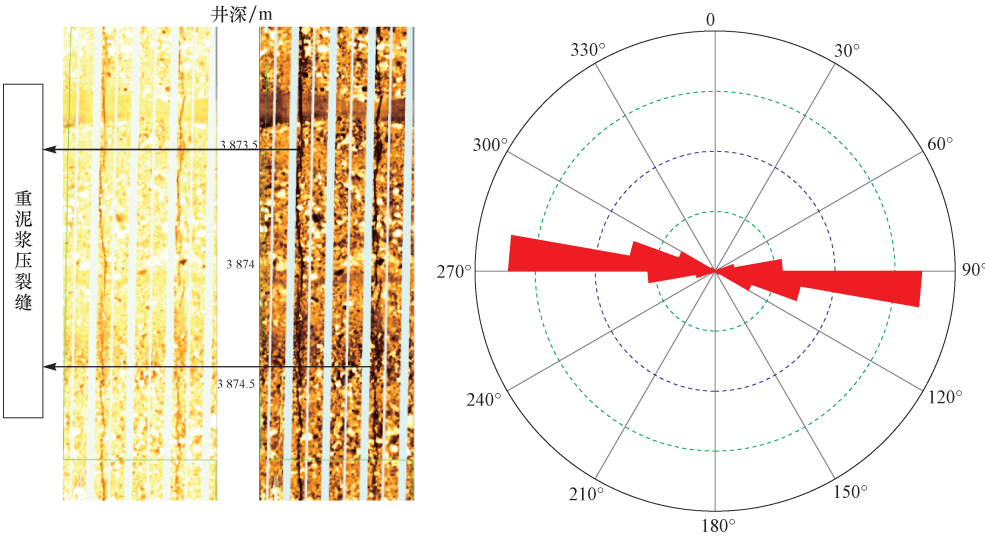


图 3 重泥浆压裂缝
Fig. 3 Fractures formed by heavy mud

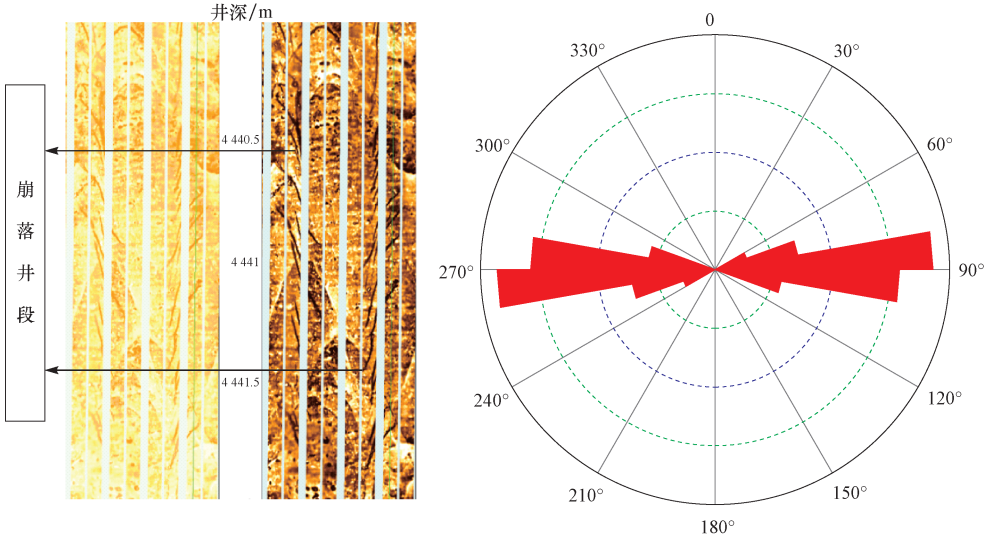


图 4 应力释放缝
Fig. 4 Fractures resulted from stress release

波可分离成两个以不同速度传播的正交子波,其中速度较大的子波叫快横波,速度较小的子波叫慢横波,这种现象叫做横波分裂^[10]。在对应情况下,快横波的偏振方向分别对应于水平最大主应力方向、断层与裂缝的走向或地层层理的走向^[8]。

在 GEOFRAME 软件中,经过四分量旋转可提取出快横波方位,用来代表现今最大水平主应力方位。图 5 为某井 DSI 测井处理成果图,该井 3 015 ~3 045 m 多处出现较大的快慢横波能量差,对这一井段的快横波方位进行统计,其优势方位就是现今最大水平主应力方位。

1.4 地应力方向测井表征的效果分析

为了评价各种方法的地应力评价效果,以玛 x 井为例,它具有电阻率扫描成像测井、地层倾角测井及 DSI

等测井资料,利用上述三种方法进行了测井识别研究(图 6)。从图中可以看出,三种方法具有较好的一致性,为地应力平面分布及主控因素研究提供了坚实的基础。

2 现今水平主应力方向及主控因素

现今水平应力场的方向受控于多种因素,诸如古构造运动、局部断裂或褶皱活动、岩石力学性质、岩性、剥蚀作用、冰川作用以及人工工程活动等。本次研究从古构造运动、局部断裂以及岩石力学性质出发,分析玛北地区现今水平应力场的主控因素。

2.1 现今水平主应力方向

本次研究主要利用测井资料来确定研究区的现今

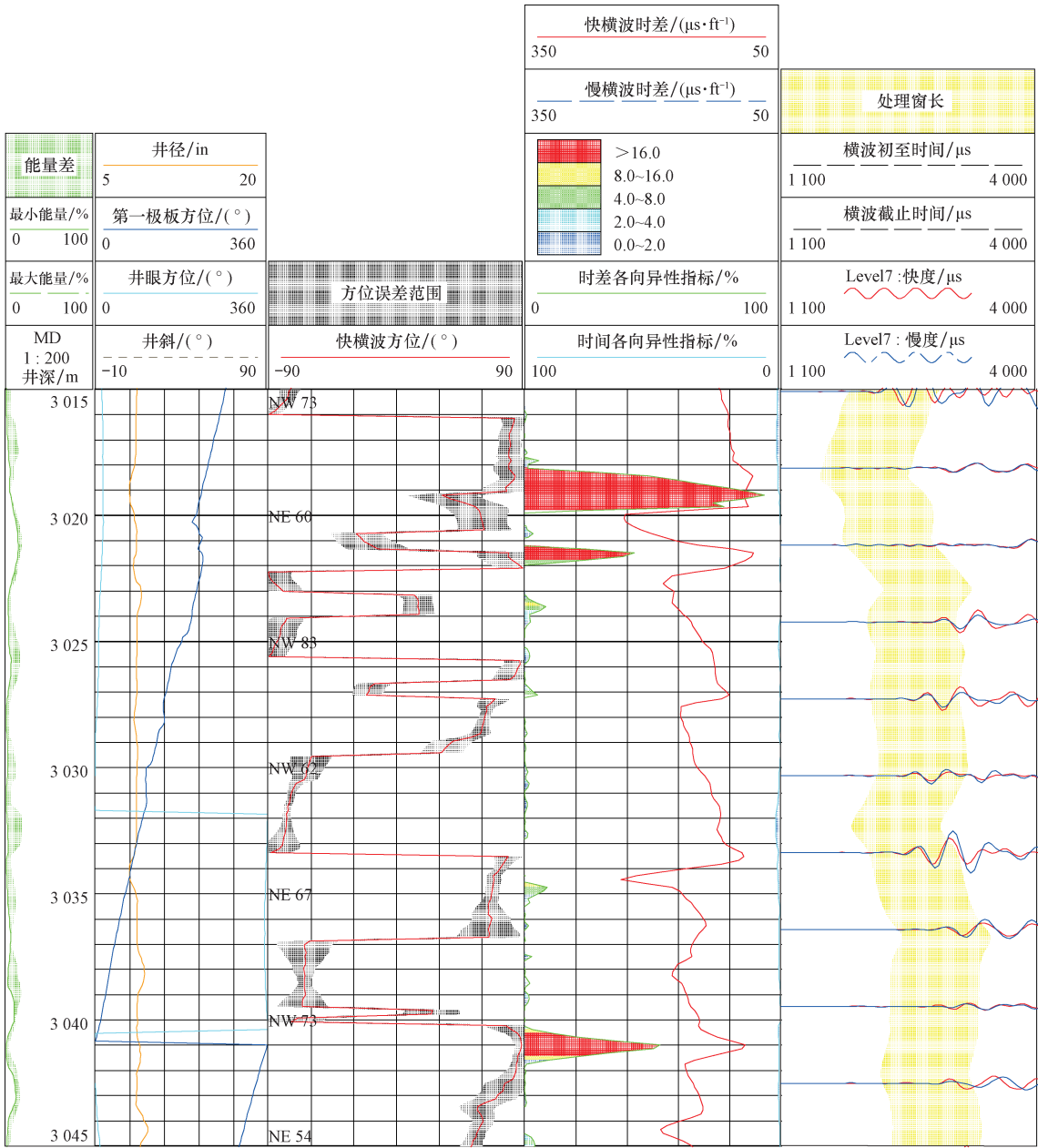


图5 DSI 测井评价地应力方位

Fig.5 DSI logging evaluation of in-situ stress orientation

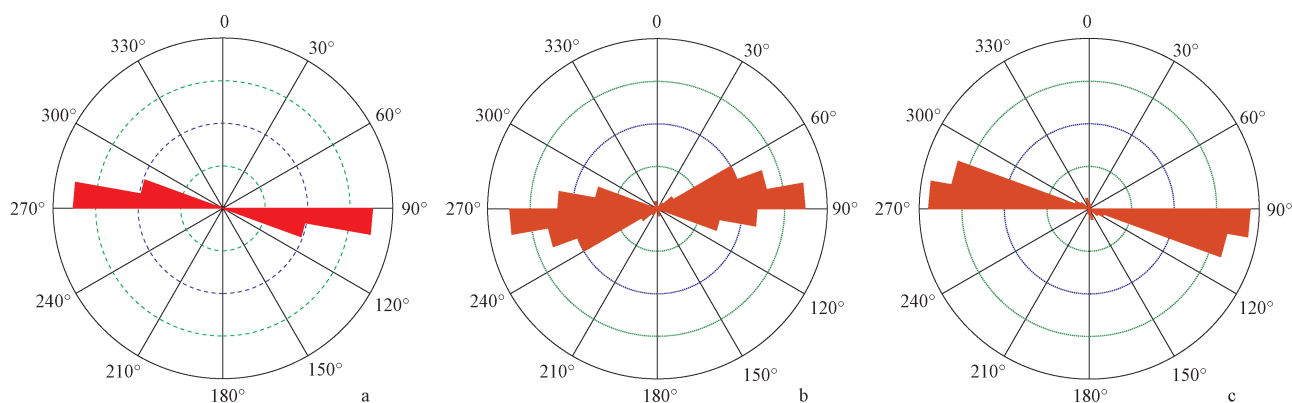


图6 玛X井三种不同测井方法评价现今最大水平主应力方位结果对比

Fig. 6 Comparison of evaluation results of the present maximum horizontal principle stress orientation in well Ma X obtained by using 3 different well logging methods

a. 井壁崩落法; b. 成像测井诱导缝法; c. 快慢横波方位法

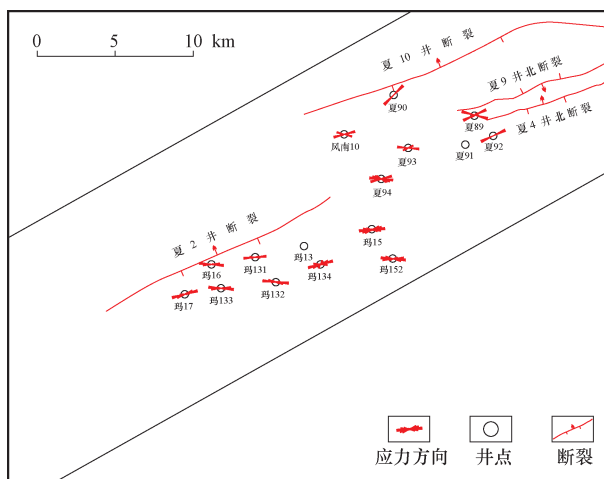


图7 玛北地区三叠系百口泉组现今最大水平主应力方向

Fig. 7 Distribution of the present maximum horizontal principle stress orientations in the Triassic Baikouquan Formation in Mabei region

水平应力场方向,对玛北斜坡14口井的测井资料进行处理分析,得到本区百口泉组地层的现今最大水平主应力方位分布情况(图7)。

从图上可以看出,玛北地区现今最大水平主应力整体上为E-W,个别井区会出现地应力方向异常,如夏90井附近现今最大水平主应力方向为NE-SW,夏92井附近现今最大水平主应力方向为NEE-SWW,而在夏89井附近现今最大水平主应力方向则为NEE-SWW和NWW-SEE。

2.2 现今水平主应力方向主控因素

2.2.1 构造因素

准噶尔盆地西北缘玛北斜坡带位于乌夏断裂带与玛湖凹陷的结合处^[11],北接乌夏断裂带,构造格局形成于白垩纪早期,构造较为简单,基本表现为东南倾的平缓单斜,局部发育低幅度平台、背斜或鼻状构造,断裂较少(图8)。

准噶尔盆地西北缘经历了多期不同性质的构造演化^[12]。自二叠纪以来断裂构造演化共经历5个阶段:海西中晚期伸展变形阶段($C_3 - P_2$);印支期压扭性变形阶段(T);燕山早期压扭性变形阶段(J);燕山晚期压扭性变形阶段(K);喜马拉雅期张剪性变形阶段(N-Q)。印支-燕山运动形成了近S-N挤压^[13]的构造格局。

乌夏断裂带处于准噶尔盆地西北缘东北部,位于哈拉阿拉特山前,是一个受多期构造叠加影响的逆冲断褶带。从海西晚期开始进入内陆盆地发育阶段,海西晚期构造运动和印支运动对本区构造格局的形成起到了至关重要的作用^[11]。乌夏断裂带在海西期活动达到了高潮,印支期活动开始减弱,燕山期几乎停止了活动^[14]。三叠纪发生印支构造运动,产生近S-N向的挤压应力,对玛北地区百口泉组的现今水平主应力方向起到了决定性的作用,致使该区百口泉组的现今最大水平主应力方向为E-W向。

2.2.2 断裂因素

研究区地应力分布表明,部分紧靠断层的井现今地应力方向出现了异常,从图7上可以看出,现今应力场方向异常的井主要是夏89井,夏90井和夏92井(图9)。玛北单斜带断层较少,褶皱不发育,整体上表现为南倾的斜坡。围绕乌夏断裂带的主体断裂衍生了许多与主断裂平行或斜交的次生断裂。玛北斜坡主要发育的断裂有夏2井断裂、夏10井断裂、夏9井北断裂和夏4井北断裂。地应力异常的三口井恰恰位于四条断裂的周围,表明断层活动对其附近地区的水平主应力方向产生了一定的影响。其中夏90井紧邻夏10井断裂,其附近现今最大水平主应力方向为NE-SW(图9b),与夏10井断裂呈一定角度相交,交角约30°,夏92井紧邻夏4井北断裂,其附近地区现今最大水平

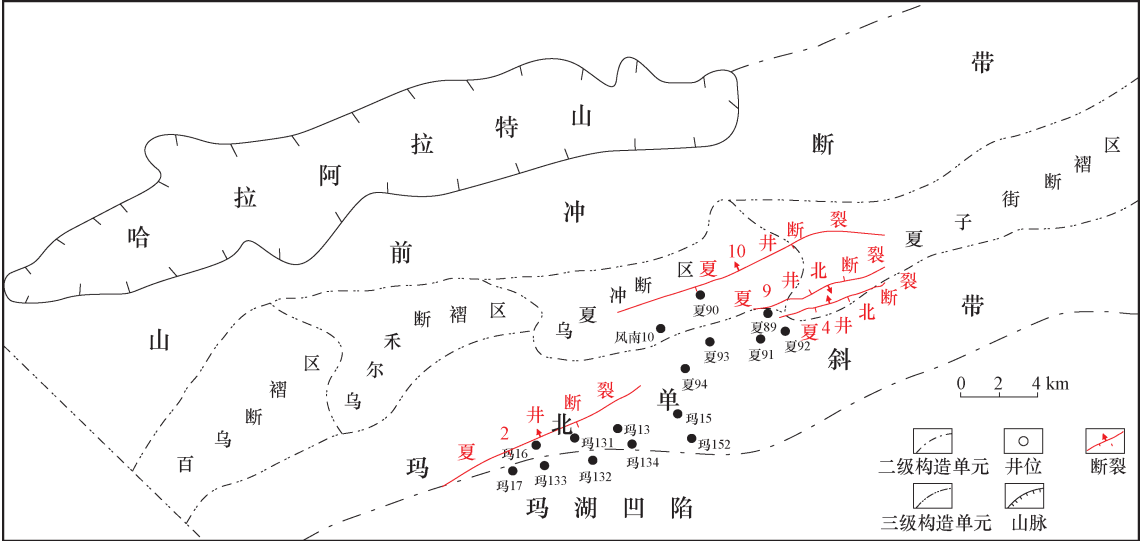


图 8 玛北地区构造分区
Fig. 8 Tectonic divisions in Mabei area

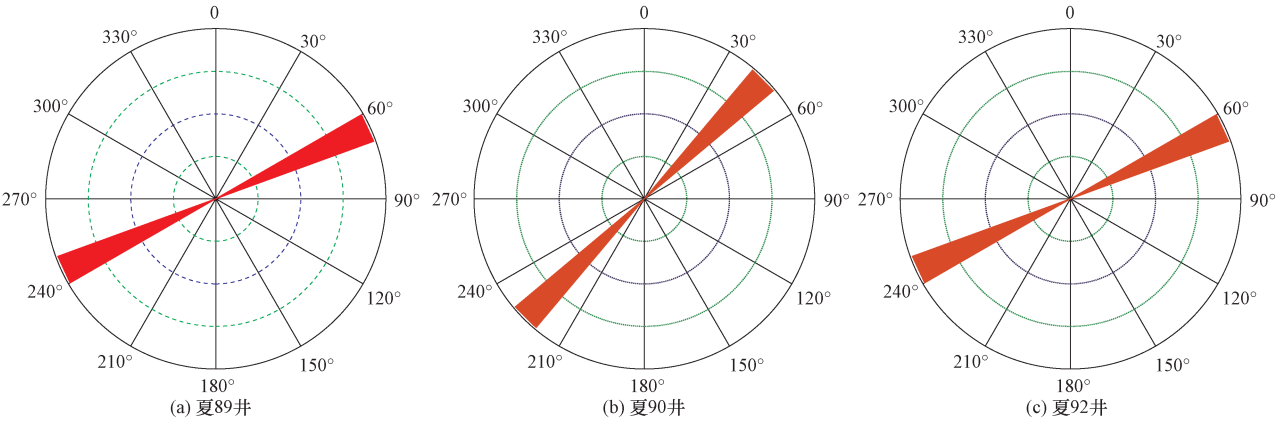


图 9 断裂附近三口井现今最大水平主应力玫瑰花图
Fig. 9 Rose diagram of the present maximum horizontal principle stress in 3 wells near faults

表 1 玛北地区断裂要素
Table 1 Fault elements in Mabei area

断层名称	断层性质	断开层位	目的层断距/m	断层产状			
				走向	倾向	倾角/(°)	延伸长度(km)
夏 2 井断裂	逆断层	P ₁ f—T ₂ k	20 ~ 100	北东东	北北西	10 ~ 80	17
夏 10 井断裂	逆断层	P ₂ w—T ₂ k	20 ~ 250	北东东	北北西	10 ~ 80	22
夏 9 井北断裂	逆断层	P ₂ w—T ₂ k	10 ~ 200	北东东	南南东	20 ~ 60	13
夏 4 井北断裂	逆断层	P ₂ w—T ₂ k	10 ~ 200	北东东	北北西	20 ~ 60	11

主应力方向为 NEE – SWW(图 9c),与夏 4 井北断层走向基本呈平行关系。夏 89 井处于夏 9 井北断裂和夏 4 井北断裂之间,其附近现今最大水平主应力方向则为 NEE – SWW 向和 NWW – SEE 向(图 9a)。前者与夏 9 井北断裂和夏 4 井北断裂基本呈平行关系,后者则与两条断裂呈一定角度相交,交角约 15°。

这三口井的现今最大水平主应力相对于区域水平应力场均发生了一定的偏转,其异常原因均与其附近的断裂有关,即局部的断裂使局部应力场方向发生改

变,可以看出这三口井的现今应力场偏转方向均为其相邻断裂的倾向方向(图 7)。研究区断裂要素统计结果表明(表 1),局部现今应力场偏转程度与断裂的规模呈正相关。例如夏 90 井紧邻的夏 10 井断裂平面延伸长度约 22 km,断距较大,该井附近现今最大水平主应力方向为 NE 方向,与研究区现今主应力场方向相比偏移了约 45°;夏 92 井紧邻的夏 4 井北断裂平面延伸长度约 11 km,断距相对较小,该井附近现今最大水平主应力方向为 NEE60°,与研究区现今主应力场方向

相比偏移了约 30° , 偏移量减小了 15° 。说明断裂对地应力场的分布具有改造作用, 其方向会沿着向断裂倾向方向偏移, 其断距越大, 地应力偏移越大。

3 结论

1) 采用地层倾角测井资料、微电阻率扫描成像测井资料和偶极子横波成像测井资料有效识别了由于钻井井孔生成产生的井眼崩落、钻井诱导缝以及快慢横波分离等现象, 建立了现今水平主应力方向的测井识别方法, 三种方法可以相互检验, 具有较好的一致性, 可以在以后的测井系列选择中进行优化设计。

2) 玛北地区三叠系百口泉组现今最大水平主应力方向为 E-W 向, 现今应力场整体受控于古构造运动, 局部地区的现今水平主应力方向的偏转与附近断裂活动有关, 其偏转方向与附近断裂的倾向相同, 偏转程度与断裂规模呈正相关。

参 考 文 献

- [1] 李志明, 张金珠. 地应力与油气勘探开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
Li Zhiming, Zhang Jinzhu. In-situ stress and exploration & development of oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [2] 范文同, 郑新华, 袁仕俊, 等. 大北高陡构造地应力测井解释及致密砂岩储层有效性评价[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(1): 66-70.
Fan Wentong, Zheng Xinhua, Yuan Shijun, et al. Explanation of earth stress logging and effectiveness evaluation of tight-sand reservoir in Dabei area with steep structure[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(1): 66-70.
- [3] 王秀娟, 杨学保, 迟博, 等. 大庆外围低渗透储层裂缝与地应力研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(5): 88-90.
Wang Xiujuan, Yang Xuebao, Chi Bo, et al. Fractures and ground stress of peripheral low permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2004, 23(5): 88-90.
- [4] 王运涛, 闫建文, 陈文思. 油藏地应力特征在低渗透油田开发设计中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(5): 30-32.
Wang Yuntao, Yan Jianwen, Chen Siwen. Application of reservoir stress characteristics to low permeability oilfield's development design[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(5): 30-32.
- [5] 葛洪魁, 林英松. 油田地应力的分布规律[J]. 断块油气田, 1998, 5(5): 1-5.
Ge Hongkui, Lin Yingsong. Distribution of in-situ stress in oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1998, 5(5): 1-5.
- [6] 黄继新, 彭仕宓, 王小军, 等. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用[J]. 石油学报, 2006, 27(6): 65-69.
Huang Jixin, Peng Shimi, Wang Xiaojun, et al. Application of imaging logging data in the research of fracture and ground stress[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 65-69.
- [7] 王连捷, 崔军文, 张晓卫, 等. 中国大陆科学钻主孔现今地应力状态[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2006, 31(4): 505-512.
Wang Lianjie, Cui Junwen, Zhang Xiaowei, et al. In-situ stress state in the main borehole of the Chinese continental scientific drilling[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(4): 505-512.
- [8] 邓虎成, 周文, 姜昊罡, 等. 构造变形对现今地应力方向的影响[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(4): 57-62.
Deng Hucheng, Zhou Wen, Jiang Haogang, et al. Effect of tectonic deformation on current geo-stress orientation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(4): 57-62.
- [9] 谢刚. 用测井资料计算最大和最小水平应力剖面的新方法[J]. 测井技术, 2005, 29(1): 82-83.
Xie Gang. A new method to calculate the maximum and minimum horizontal stress using log data[J]. Well Logging Technology, 2005, 29(1): 82-83.
- [10] 楚泽涵, 高杰, 黄隆基, 等. 地球物理测井方法与原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008. 312-313.
Chu Zehan, Gao Jie, Huang Longji, et al. The principle and methods of geophysical well log[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008, 312-313.
- [11] 何琰, 牟中海, 裴素安, 等. 准噶尔盆地玛北斜坡带油气成藏研究[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(6): 8-11.
He Yan, Mou Zhonghai, Pei Su'an, et al. The exploration target of oil-gas mabei slope area of Zhungar basin[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(6): 8-11.
- [12] 雷振宇, 鲁兵, 蔚远江, 等. 准噶尔盆地西北缘构造演化与扇体形成和分布[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(7): 86-91.
Lei Zhenyu, Lu Bing, Wei Yuanjiang, et al. Tectonic evolution and development and distribution of fans on northwestern edge of Junggar basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(7): 86-91.
- [13] 李丕龙, 冯建辉, 陆永潮, 等. 准噶尔盆地构造沉积与成藏[M]. 北京: 地质出版社, 2010, 30-31.
Li Pilong, Feng Jianhui, Lu Yongchao, et al. Tectonic, sedimentary and entrapment of Junggar Basin[M]. Beijing: Geology Press, 2010, 30-31.
- [14] 谭开俊, 张帆, 赵应成, 等. 准噶尔盆地西北缘构造特征分段性对比分析[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(2): 1-3.
Tan Kaijun, Zhang Fan, Zhao Yingcheng, et al. Comparative analysis on the segmentation of tectonic characteristic in Northwest Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(2): 1-3.
- [15] 徐向荣, 马利成, 唐汝众. 地应力及其在致密砂岩气藏压裂开发中的应用[J]. 钻采工艺, 2000, 23(6): 17-21.
Xu Xiangrong, Ma Licheng, Tang Ruzhong. Application of formation stress in fracturing development for tight sandstone reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(6): 17-21.

(编辑 董立)