

富台潜山凤山组现今地应力场数值模拟及有效裂缝分布预测

戴俊生¹, 商琳², 王彤达³, 贾开富⁴

(1.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580;2.中国石油冀东油田分公司勘探开发研究院,河北唐山 063004;3.中国石化胜利油田分公司地质科学研究院,山东东营 257015;4.中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院,新疆克拉玛依 834000)

摘要:为明确富台潜山凤山组现今地应力特征,根据钻井诱导缝走向及井壁崩落方向对其现今地应力方向进行判断,并通过测井资料及经验公式计算得出关键井现今地应力。通过确定岩石力学参数并建立有限元模型,以关键井地应力为约束条件,对研究区凤山组现今地应力场进行数值模拟,分析现今地应力场对裂缝有效性的影响,进而预测有效裂缝分布。研究表明,富台潜山凤山组水平最大主应力为90.6~181 MPa,为北东东—南西西方向;水平最小主应力为61.9~110 MPa,为北北西—南南东方向。断裂带为应力低值区,东、西两侧低洼地带为应力高值区,背斜核部为应力分布稳定区,背斜两翼存在应力变化梯度带。北东东—南西西方向为研究区凤山组有效裂缝优势走向,有效裂缝发育最有利地区为背斜核部,其次为背斜两翼,东、西两侧低洼地带则不利于有效裂缝的保存。

关键词:现今地应力 数值模拟 有效裂缝 凤山组 富台潜山

中图分类号: TE112.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)06-0033-04

地应力往往影响和控制着油气田开发过程中油气水的运聚,特别是现今地应力场,对于油气田的开发具有重要意义^[1-2]。研究现今地应力,可以为油田开发过程中注采井网的布置、调整及开发方案设计等提供科学的背景资料^[3-6];可宏观研究地层物性的变化,制定相应的储层开发方案^[7]。富台油田为裂缝性潜山油藏^[8],前人通过分析现今地应力场方向对其裂缝的有效性进行了评价^[9],但未考虑地应力大小对裂缝有效性的影响,且目前对有效裂缝的分布规律仍不明确。为此,笔者对富台潜山凤山组现今地应力分布进行研究,以关键井水平主应力方向和数值为约束条件,应用弹性三维有限元法模拟地层的现今地应力场,并对现今地应力场对裂缝有效性的影响进行分析,预测有效裂缝的分布,以期对研究区的油气勘探开发起到指导和借鉴作用。

1 地质概况

富台潜山为一短轴背斜,其长轴方向为北北西向,东翼较陡、西翼宽缓,背斜高点位于车古20—车

古201井一线。研究区北部以埕南大断层为界,东部以埕南二台阶断层为界,内部受次级断层分割复杂化^[8-9]。寒武系凤山组为富台潜山主要含油层系,是以白云岩为主的海相碳酸盐岩沉积,埋深为4 000~5 000 m,比较致密,原生孔隙不发育,基质孔隙度和渗透率普遍较低,基本不具有储集性能^[10-11],构造裂缝是其油气的主要储集和渗流空间。

2 关键井现今地应力

受现今地应力场影响,在钻井过程中会产生1组与现今地应力场相关的诱导缝及井壁崩落^[8]。诱导缝在FMI成像上表现为1组平行且呈180°对称的高角度裂缝,其走向与现今水平最大主应力方向平行。此外,在钻井过程中,随着井筒岩心的不断取出,井壁发生应力释放,往往在井壁的应力集中或者脆弱处产生井壁崩落,井壁崩落的方向一般平行于现今水平最小主应力方向^[12-13]。因此,现今主应力的方向可以通过钻井诱导缝的走向和井壁崩落方向来确定。

收稿日期:2014-09-01。

作者简介:戴俊生,男,教授,博士,从事构造地质学方面的综合研究。联系电话:(0532)86981992,E-mail:djsh3@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“复杂裂缝性碳酸盐岩油藏开发关键技术”(2011ZX05014-004),中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“准东南部构造演化及对储层的控制”(12CX06004A)。

对富台潜山车古201、车古201-1、车古202、车古203、车古204、车古204-3、车古205和车古207-1共8口井钻井诱导缝走向及井壁崩落方向的统计结果(图1)表明,研究区钻井诱导缝的走向集中分布于60°~90°,即北东东—南西西方向(图1a),井壁崩落主要产生于北北西—南南东方向(图1b),由此可判断富台潜山现今水平最大主应力方向为北东东—南西西方向,现今水平最小主应力方向为北北西—南南东方向。

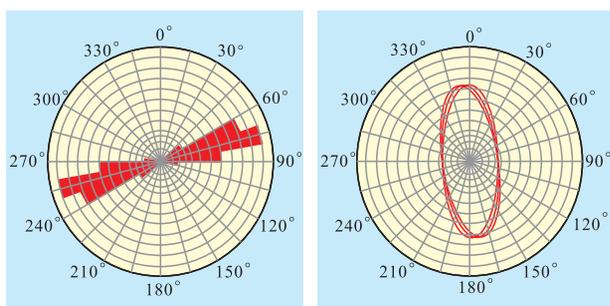


图1 富台潜山凤山组钻井诱导缝走向及井壁崩落方向

现今地应力可以通过多种方法来测量,如水力压裂法、差应变分析法、波速各向异性法、钻孔应力解除法和测井解释法^[14]。根据测井解释的地应力资料,应用胜利油区现今地应力计算公式^[15-16]可确定研究区关键井现今的水平最大主应力和水平最小主应力(表1)。

表1 富台潜山凤山组关键井现今水平主应力计算及数值模拟结果

井号	埋深/m	水平最大主应力/MPa		水平最小主应力/MPa	
		计算结果	数值模拟结果	计算结果	数值模拟结果
车古201	4 012	112.8	113	75.6	75.3
车古202	4 173	118.3	118	80.2	80.6
车古203	4 093	115.6	116	78.4	79.5
车古204	4 373	123.1	121	84.2	83.0
车古205	4 403	124.1	123	86.2	85.9
车古208	4 670	136.2	136	91.1	91.2
车古209	5 003	148.5	150	97.4	96.7

3 现今地应力场数值模拟

3.1 模型建立与应力加载

应用弹性三维有限元法对富台潜山凤山组现今地应力场进行数值模拟。研究区凤山组以白云岩为主,其岩石力学参数测试结果为:密度为2 710 kg/m³,弹性模量为38.26 GPa,泊松比为0.3;断裂带

的密度为2 325 kg/m³,弹性模量为32.23 GPa,泊松比为0.29。将岩石力学参数赋予对应的模型实体,然后合理划分网格,将富台潜山凤山组地质模型划分出9 233个网格节点和29 720个网格单元(图2)。

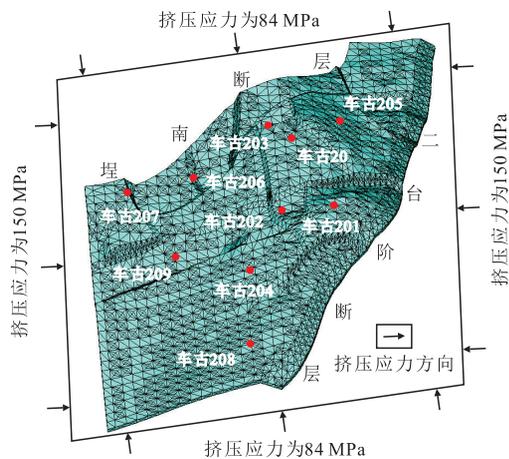


图2 富台潜山凤山组弹性三维有限元模型

为方便施加应力载荷,减小边界效应,在模型外围添加一长方体外框,其东西边界方向为343°,与水平最大主应力方向垂直,南北边界方向为73°,与水平最小主应力方向垂直。以关键井的地应力为约束条件,通过对模型边界施加不同的载荷,使数值模拟结果逼近约束条件。由于富台潜山凤山组现今整体处于挤压环境,经过反复调试,最终确定南北边界施加的挤压应力为84 MPa,东西边界为150 MPa(图2),其中上覆地层垂向主应力可通过设置重力加速度由软件自动产生。

3.2 结果分析

3.2.1 水平最大主应力

富台潜山凤山组现今地应力场数值模拟结果表明,其现今水平最大主应力为压应力,应力值为90.6~181 MPa(图3a)。断裂带为应力低值区,其值为90.6~111 MPa;研究区东、西两侧的低洼地带(车

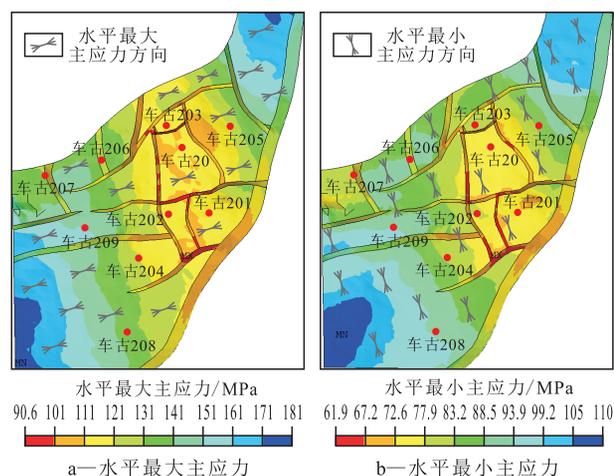


图3 富台潜山凤山组水平应力分布

古205井以东及车古209—车古208井以西)为应力高值区,为161~181 MPa;背斜核部(车古203—车古20—车古202—车古201井一带)的应力分布稳定,为111~121 MPa;背斜两翼包括东翼车古205井区及西翼车古206—车古209—车古204—车古208井一带出现应力变化梯度带,应力变化较快,并向深部逐渐增大,其值为121~161 MPa。富台潜山凤山组水平最大主应力方向基本为北东东—南西西方向,与钻井诱导缝的走向一致。

3.2.2 水平最小主应力

富台潜山凤山组现今水平最小主应力为压应力,其值为61.9~110 MPa(图3b)。水平最小主应力的分布趋势与水平最大主应力相似,断裂带为应力低值区,其应力小于67.2 MPa;研究区东、西两侧的低洼地带为应力高值区,应力为99.2~110 MPa;背斜核部为应力分布稳定区,应力为72.6~77.9 MPa;背斜两翼出现应力变化梯度带,应力为77.9~99.2 MPa。研究区水平最小主应力方向基本为北北西—南南东方向,与钻井井壁崩落的方向一致。

4 有效裂缝分布预测

研究区车古201等7口井数值模拟的水平最大主应力和水平最小主应力与关键井现今水平主应力的计算结果对比表明,其数值相差较小(表1),证实应用弹性三维有限元法对富台潜山凤山组现今地应力场的数值模拟结果具有较高的可信度,可据此对研究区凤山组有效裂缝的分布进行预测。

富台潜山凤山组上覆岩层重力产生的应力约为100 MPa,现今水平最大主应力为90.6~181 MPa,水平最小主应力为61.9~110 MPa,其差应力较小。在这样的三向压应力状态下,岩石难以达到破裂极限、产生新的裂缝,因此研究区储层中的裂缝是由古应力场产生的,其裂缝密度不受现今地应力场的影响;但由于压缩作用,导致裂缝逐渐闭合,开度减小^[17-18]。在经典的光滑、平直、2块无限长平行板裂缝渗流模型中,渗透率与裂缝开度的三次方成正比^[19],因此开度对裂缝的渗流能力具有显著的影响,能否正确预测裂缝现今开度决定着油藏描述的有效性。裂缝开度受现今地应力场的控制,若不考虑裂缝壁内流体的化学反应,则现今地应力场和裂缝开度具有较好的函数关系。Willis等提出了裂缝现今开度与现今地应力的关系式^[20],认为裂缝现今开度与裂缝表面承受的正应力成反比。据此可知,裂缝表面承受的正应力越大,裂缝闭合程

度越高;当裂缝走向与水平最大主应力方向垂直时,裂缝表面承受的正应力最大,与水平最大主应力相等时,裂缝闭合程度最高;当裂缝走向与水平最小主应力方向垂直时,裂缝表面承受的正应力最小,与水平最小主应力相等时,裂缝现今开度最大。由此认为,研究区凤山组有效裂缝的优势走向为北东东—南西西方向(图4)。

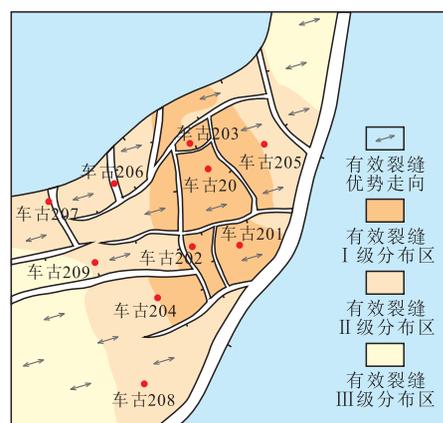


图4 富台潜山凤山组有效裂缝分布预测

根据富台潜山凤山组水平主应力的分布特征,在平面上可将其有效裂缝分布划分为3个等级(图4)。其中,有效裂缝I级分布区位于背斜核部附近,包括车古20、车古201、车古202和车古203井,其水平主应力较小,裂缝开度和渗流能力均较高,为良好储层发育的最有利区域;有效裂缝II级分布区位于背斜两翼,包括车古204、车古205、车古206、车古207、车古208和车古209井,其水平主应力变化较大,裂缝闭合程度具有突变性,储层非均质性较强;有效裂缝III级分布区位于研究区东、西两侧的低洼地带,其水平主应力最大,裂缝的闭合程度最高,裂缝现今开度最小,渗流能力较差,因此不利于储层的发育。

5 结束语

富台潜山凤山组水平最大主应力为北东东—南西西方向,水平最小主应力为北北西—南南东方向。数值模拟结果表明,研究区凤山组的现今水平最大主应力为90.6~181 MPa,水平最小主应力为61.9~110 MPa;其中,断裂带为应力低值区,东、西两侧的低洼地带为应力高值区,背斜核部为应力分布稳定区,背斜两翼存在应力变化梯度带。综合分析富台潜山凤山组现今地应力场,认为其有效裂缝的优势走向为北东东—南西西方向;背斜核部裂缝的现今开度较大,渗流能力较高,为良好储层发育

的最有利区域,其次为背斜两翼,而东、西两侧低洼地带的现今地应力最高,裂缝现今开度最小,渗流能力较差,不利于储层的发育。此外,有效裂缝的分布受古裂缝分布、裂缝溶蚀及充填等因素影响,根据现今地应力场特征,仅能对有效裂缝的分布进行宏观预测,若获得更为精确的有效裂缝分布特征还有待于进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 马寅生.地应力在油气地质研究中的作用、意义和研究现状[J].地质力学学报,1997,3(2):41-46.
- [2] 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.
- [3] 周文,闫长辉,王世泽,等.油气藏现今地应力场评价方法及应用[M].北京:地质出版社,2007.
- [4] 李春林,郭鹏,任德生.大民屯凹陷构造应力场及其与油气运聚关系[J].油气地质与采收率,2013,19(6):47-49.
- [5] 郭鹏,李春林,哈文雷,等.构造应力场与油气运聚规律探讨——以鄂尔多斯盆地苏10区块为例[J].特种油气藏,2011,18(5):64-66.
- [6] 谢润成,周文,陶莹,等.有限元分析方法在现今地应力场模拟中的应用[J].石油钻探技术,2008,36(2):60-63.
- [7] 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.
- [8] 童亨茂,郑磊.三维地震资料在古应力场反演和裂缝预测中的应用——以胜利油田富台潜山为例[J].地质科学,2007,42(1):45-57.
- [9] 王玉芹,王军,范崇海,等.车镇凹陷富台油田古生界潜山裂缝评价[J].油气地质与采收率,2002,9(3):34-36.
- [10] 王永诗.箕状断陷湖盆滑脱潜山油气成藏模式——以富台油田为例[J].油气地质与采收率,2004,11(4):13-15.
- [11] 刘显太,王玉芹,杜玉山,等.背斜构造裂缝性碳酸盐岩油藏裂缝网络发育模式——以胜利油田富台油田车古201潜山为例[J].油气地质与采收率,2011,18(6):70-73.
- [12] 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.
- [13] 宋梅远,张善文,王永诗,等.沾化凹陷沙三段下亚段泥岩裂缝储层岩性分类及测井识别[J].油气地质与采收率,2011,18(6):18-22.
- [14] 汪必峰,戴俊生.牛35块沙河街组三段Es₃⁴现今地应力研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2007,33(3):24-27.
- [15] 刘显太,戴俊生,徐建春,等.纯41断块沙四段现今地应力场有限元模拟[J].石油勘探与开发,2003,30(3):126-128.
- [16] 朱苏阳,李传亮,董凤玲.基于三维地应力的渗透率转换方法[J].油气地质与采收率,2013,20(4):69-71.
- [17] 姜建伟,李红茹,李远光,等.安棚深层系裂缝特征重新认识与井网调整[J].油气地质与采收率,2012,19(2):26-28.
- [18] 陈迎宾,郑冰,袁东山,等.大邑构造须家河组气藏裂缝发育特征及主控因素[J].石油实验地质,2013,35(1):29-35.
- [19] 季宗镇,戴俊生,汪必峰.地应力与构造裂缝参数间的定量关系[J].石油学报,2010,31(1):68-73.
- [20] Willis R J, Wallroth T. Approaches to the modelling of HDR reservoirs: A review[J]. Geothermics, 1995, 24(3): 307-332.
- [1] 井缝洞单元注水开发模式[J].油气地质与采收率,2013,20(2):58-61.
- [2] Li K, Cai C, He H, et al. Origin of palaeo-waters in the Ordovician carbonates in Tahe oilfield, Tarim Basin: constraints from fluid inclusions and Sr, C and O isotopes[J]. Geofluids, 2011, 11(1): 71-86.
- [3] 张文博.塔河油田四区和七区缝洞储层地质特征研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2012:59.
- [4] 常华进,储雪蕾,冯连君,等.氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J].地质论评,2009,55(1):91-99.
- [5] Loucks R G. A review of coalesced, collapsed-paleocave systems and associated suprastratal deformation[J]. Acta Carsologica, 2007, 36(1): 121-132.
- [6] 夏日元,邹胜章,梁彬.塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究[M].北京:地质出版社,2011:167-191.
- [7] 李阳.塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征[J].中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(1):1-7.
- [8] 刘中春.塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏提高采收率技术途径[J].油气地质与采收率,2012,19(6):66-68,86.
- [9] 俞仁连,傅恒.构造运动对塔河油田奥陶系碳酸盐岩的影响[J].天然气勘探与开发,2006,29(2):1-6.
- [10] 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.
- [11] 吴文明,秦飞,欧阳冬,等.塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏堵水技术[J].油气地质与采收率,2013,20(6):104-107.
- [12] 牛玉静,康志宏,龙旭,等.塔河油田奥陶系岩溶油藏溶洞储集体成因及演化[J].现代地质,2011,25(4):650-659.
- [13] 牛永斌,钟建华,王培俊,等.成岩作用对塔河油田二区奥陶系碳酸盐岩储集空间发育的影响[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(6):13-19.
- [14] 胡向阳,李阳,王友启,等.三维地质模型概率法在碳酸盐岩缝洞型油藏石油地质储量研究中的应用——以塔河油田四区为例[J].油气地质与采收率,2013,20(4):46-48,61.
- [15] 李红凯,袁向春,康志江.塔河油田六七区碳酸盐岩储层类型及分布规律研究[J].特种油气藏,2013,20(6):20-24.
- [16] 陈强路,钱一雄,马红强,等.塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩成岩作用与孔隙演化[J].石油实验地质,2003,25(6):729-734.

编辑 邹澍滢

(上接第32页)

编辑 经雅丽