

# 川西凹陷新场气田三维地应力场反演分析

王峥嵘<sup>1,2</sup>, 邓辉<sup>1</sup>, 黄润秋<sup>1</sup>

(1.成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都 610059;2.中兵勘察设计研究院 北京 100053)

**摘要:**根据川西凹陷新场地区及邻区已有的地层岩性、地质构造及其演化等资料,结合深部岩体钻井岩心裂缝发育特征编录、完井报告、录井测井地应力和裂缝分析成果,建立了研究区的地质模型。利用已有的井孔崩落、钻井诱导缝分析、水压致裂曲线分析、岩石 Kaiser 效应测试等技术所获得的地应力资料,作为计算模型的应力边界条件和地应力场反演的井段现今地应力参考值,采用三维数值模拟技术对川西凹陷新场气田进行了三维地应力场反演分析。研究表明,总体上最大水平主应力以近 NEE-SWW 向为主,但在断层附近主应力方向发生明显偏转,主体方位与区域构造应力作用主方向一致。各主地应力值总体上随深度的增加而变大,与深度之间有较好的线性相关关系,由于新场须二段各目的层均发育较多断裂构造,因此其应力场表现出明显的不连续性,使地应力值和方向发生局部变化,在断层端部和转折部位表现出较明显的最大主应力和剪应力集中现象,而在断层两盘部位则出现应力消散特点。

**关键词:**地质模型;三维数值模拟;地应力反演;新场气田;川西凹陷

中图分类号:TE319

文献标识码:A

## Three-dimensional inversion of geostress in Xinchang gas field, Western Sichuan Sag

Wang Zhengrong<sup>1,2</sup>, Deng Hui<sup>1</sup>, Huang Runqiu<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2.China Ordnance Industry Survey & Geotechnical Institute, Beijing 100053)

**Abstract:** According to the formation lithology, geological structure and structure evolution of Xinchang area and its vicinity in the Western Sichuan Sag, the geologic model of research area was established, combining with the analysis results of drilling core fracture development characteristics, well reports, geostress and crack analysis. Geostress data were obtained from the analysis of borehole breakout data, drilling-induced fracture, hydraulic fracturing curve and rock Kaiser effect test. Those data were used as modern geostress reference values during model boundary conditions computing and geostress field inversion. The research results show that generally the maximum horizontal principal stress is nearly NEE-SWW. But it is apparently deflected near to the faults. And main subject orientation and regional tectonic stress are in the same direction. On the whole, main stress value increases with depth, and it has a good linear relationship with depth. Since fault structures developed in every stratum in the second member of the Xujiahe Formation, stress field shows obvious discontinuity, which makes geostress change in values and direction. There are obvious maximum principal stress and shear stress concentration phenomenon in fault ends and turning parts. However, stress dissipating appears in both sides of fault.

**Key words:** geologic model; three dimensional numerical simulation; geostress inversion; Xinchang gas field; Western Sichuan Sag

深部地应力问题是当今石油行业的石油地质和岩石力学面临的重大问题之一,已引起国内外研究者的高度重视。油气藏构造应力场在预测油气富集区、油气藏开发方案的优化、解决水力压裂及重复地层压裂问题、异常地层压力预测、定向射孔

以及井壁稳定性等生产和科研工作中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。目前应力测试评价的具体方法主要有:水力压裂测试地应力<sup>[2-4]</sup>、井壁崩落法地应力分析<sup>[5-6]</sup>、钻井诱导缝地应力分析<sup>[7]</sup>、声发射测定地应力<sup>[8-10]</sup>、地应力的计算分析<sup>[11-12]</sup>以及地应力场

收稿日期:2014-08-20;修订日期:2014-11-10。

作者简介:王峥嵘(1970—),女,博士研究生,高级工程师,从事地质工程专业研究。E-mail:13701067318@163.com。

基金项目:国家自然科学基金“油气场深部多期地应力场反演及裂缝预测研究”项目(41272332)资助。

的数值模拟反演等。由于地应力测试技术要求较高,费用较大,难于进行大量测量工作;而地应力场研究的对象往往具有地质构造形态复杂、地层介质分布不均匀、岩石物理性质多样的特点。因此,研究地应力场的较好方法是根据有限个测点的地应力资料,借助于岩石力学的基本理论进行数值模拟反演分析。其基本思想为:在依据相关地质资料建立三维地质计算模型的基础上,依据已知位置点的实测应力值,通过数值计算反演,从而计算得到更符合实际的地应力场分布规律<sup>[13]</sup>。

本文选择新场气田作为研究对象,新场气田是川西拗陷孝泉—新场—合兴场地区的大型气田,研究表明深层须家河组气藏具有巨大的勘探潜力,已在须二和须四段获得了不少油气成果。对于该地区地应力场的研究具有十分重要的意义。

## 1 基本地质特征

川西凹陷新场气田地表出露地层为第四系,通过钻孔揭露,地层层序自上而下为第四系、白垩系剑门关组、侏罗系蓬萊镇组、遂宁组、沙溪庙组、千佛崖组、白田坝组与三叠系须家河组、小塘子组。

新场气田处于四川盆地川西拗陷中段孝泉—丰谷北东东向大型隆起带上,该隆起带位于彭州—德阳向斜和梓潼向斜之间,是从晚三叠世以来经历了多期构造运动的古今复合大型隆起带。其中最具影响力的是印支晚期、燕山期及喜马拉雅期。每次构造运动都对川西拗陷产生重大的影响,使其构造、沉积表现出复杂性。新场构造整体上表现为NEE向的背斜构造,构造南北两翼表现为南陡北缓。纵向深部地层是由多个构造高点组成完整的NEE向复式背斜,断裂较为发育,而中浅层渐变为向东倾没的NEE向鼻状构造,断裂发育程度明显减弱。新场须四构造为由孝泉高点、新场高点、罗江高点等多个局部高点构成的鼻状背斜。新场须二构造是由多个NE、SN、NEE向高点组成的NEE向复式背斜(图1)<sup>[14-16]</sup>。

## 2 三维地应力场反演分析

总体研究思路及技术路线是:从地质原型入手,首先收集新场地区及邻区已有的地层岩性、地质构造及其演化等方面的资料,对研究区构造特征进行全方位、系统的调查研究,同时结合深部岩体钻井岩心观察、录井、测井、完井资料的对比研究,建立研究区的地质模型,根据研究范围确定地应力分析的几何边界条件。结合已有的井孔崩落、钻井

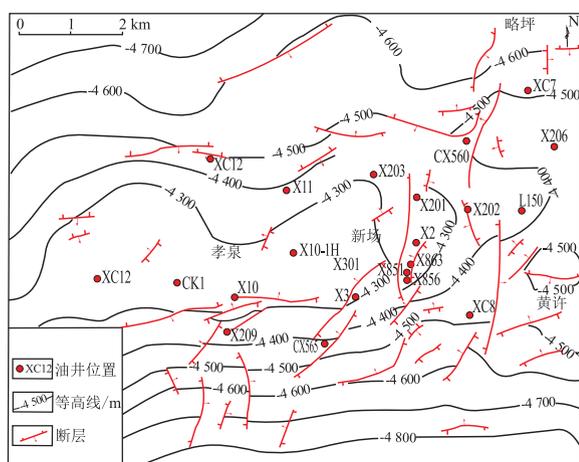


图1 川西凹陷新场气田须家河二段第四砂组顶板构造及断层分布

Fig.1 Roof structure and faults distribution of fourth sand group of second member of Xujiahe Formation in Xinchang gas field, Western Sichuan Sag

诱导缝分析、水力压裂曲线分析、微压裂地应力测试、Kaiser 效应测试等技术所获得的地应力资料,综合分析单一井段的现今地应力值。通过高温高压围压岩石力学实验、物理模拟和岩石力学分析确定深部岩体的物理力学参数,建立深部岩石的本构关系。然后利用工程地质的系统工作方法(主要包括概念模型的建立、物理模拟以及二维、三维数值模拟方法)和构造地质学的分析方法,分析研究区地应力场特征。

### 2.1 地质原型的建立

建模过程中,以地震解译资料获得的三叠系须家河四段底界作为计算模型的起点,向上叠加须家河四段、五段,侏罗系下统、中统、上统,白垩系、第三系、第四系地层;向下分别叠加须家河三段、须家河二段第二砂组、第四砂组、第七砂组反射层;以地震解译资料获得的马鞍塘组底界反射层作为计算模型中三叠系地层的底界;最后马鞍塘底界向下投影到同一高程平面-6 000 m 上,构成计算模型的底界。这样将各岩层底顶底层进行叠加即可构成数值计算模型的几何模型(图2)。

### 2.2 物理力学参数

本次计算采用弹塑性模型,由于室内实验测试的是岩石块体的物理力学参数,因此在计算过程中采用的岩石物理力学参数主要参考实验,结合岩层岩体结构特征,通过工程地质类比选取<sup>[17]</sup>,具体参数如表1所示。

### 2.3 地应力方向分析

在油气田领域用来测量现今地应力的方法和手段主要有:嵌入式人工裂缝实时监测技术(由于该监



### 2.5 计算结果分析

研究区在喜马拉雅运动期间的主应力特征,根据计算结果可以得出以下基本认识:

(1)总体上,研究区上部地层(白垩系以上)在喜马拉雅运动期间最大主应力近于水平,最大主应力方向约 NE 80°~90°,倾角约 5°~15°;从侏罗系地层开始往下,最大主应力方向逐渐偏转,随着深度加深,最大主应力逐渐由表部的水平向转至近垂直向。

(2)断层往往对主应力方向有较大影响,断层周围一定范围内最大主应力方向常表现出多变的特点。具体表现为平面上在断层两盘最大主应力一般与断层延伸方向垂直,在断层转折部位最大主应力一般与其切线方向平行;剖面上在断层两盘最大主应力往往与断层面平行。

(3)从目的层须二段第七、第四、第二砂组计算结果来看,总体上最大水平主应力以近 NEE-SWW 向为主,但在断层附近(尤其是 F3、F4 断层附近)主应力方向发生明显偏转,如图 4,5 所示。

(4)对于此次研究的目的层须二段 3 个砂组,由于其厚度相对较薄,因此其顶板、底板地形起伏情况对其应力分布也有较大的影响。主要体现在地形凹的部位主应力出现消散的现象,而在地形凸起、以及断层切割形成的一些棱角部位主应力集中现象较为明显。

(5)总体上,研究区应力场特点随着深度的增加呈现出均匀、连续分布—非连续分布—均匀、连续分布的情况。以须家河、白田坝组地层为界,其上部、下部的地层中断层发育较少,且各地层顶底板地形较平缓,基于以上两点原因,应力场的分布

较均匀、连续;而在须家河和白田坝组地层中,由于断层的发育,造成应力场分布连续性较差,应力集中现象较明显,尤其是在须二段第七、第四、第二砂组中,由于这 3 层相对较薄,且被断层切割严重(尤其规模较大的 F3 断层),从而造成在这 3 个地层中最大主应力、剪应力往往表现出较为强烈的集中现象,在断层周围这样的现象更明显,最小主应力还会出现一定范围的拉应力。

(6)受断层影响,最大主应力在断层两端及转折部位出现较明显的集中现象(图 6),而在断层两侧一定范围内,最大主应力往往出现消散现象;最小主应力在断层两盘一定范围内出现较为明显的拉应力;剪应力在断层两端及转折部位也出现较为明显的集中现象。

(7)此外,成点状分布的最小主应力集中现象主要是由于上部地层中的断层及地形起伏造成的(图 7)。

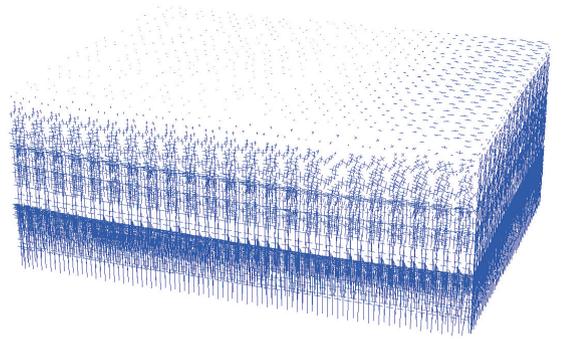


图 4 川西凹陷新场气田喜马拉雅运动期研究区总体主应力方向

Fig.4 Overall principal stress direction in Xinchang gas field of Western Sichuan Sag during Himalayan stage

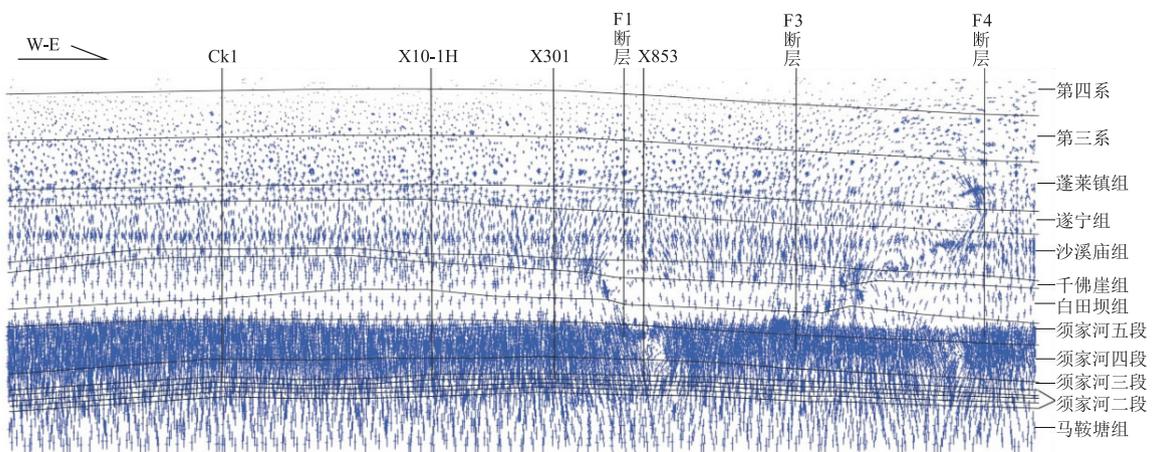


图 5 川西凹陷新场气田喜马拉雅运动期研究区纵剖面主应力方向

Fig.5 Principal stress direction of longitudinal section in Xinchang gas field of Western Sichuan Sag during Himalayan stage

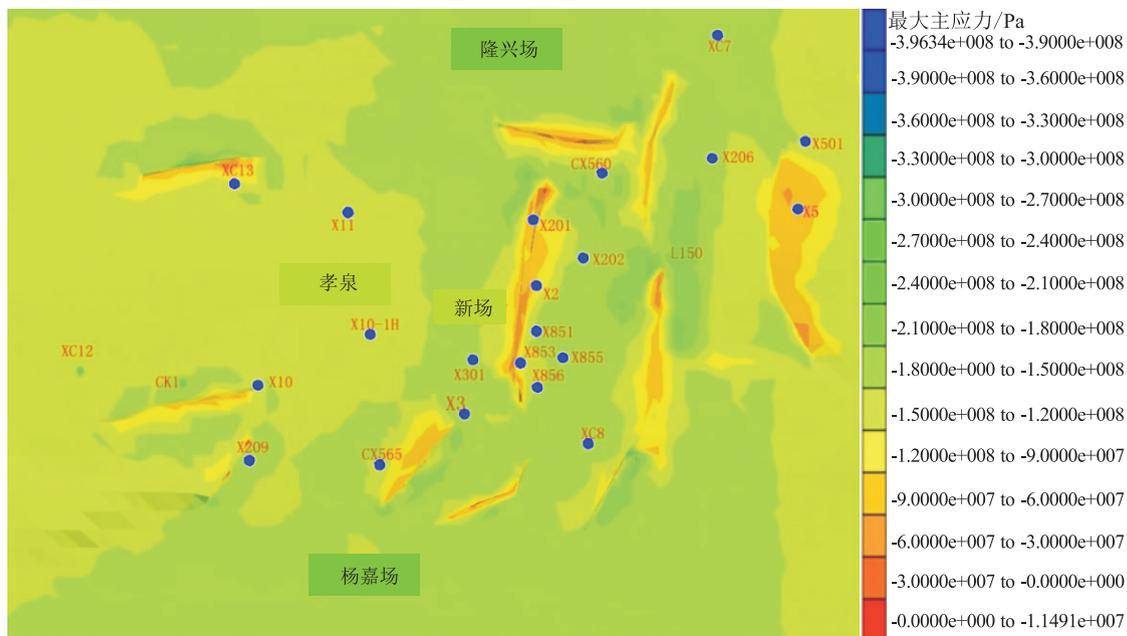


图 6 川西凹陷新场气田须家河二段第四砂组顶最大主应力等值线

Fig.6 Maximum principal stress contour of fourth sand group of second member of Xujiache Formation in Xinchang gas field, Western Sichuan Sag

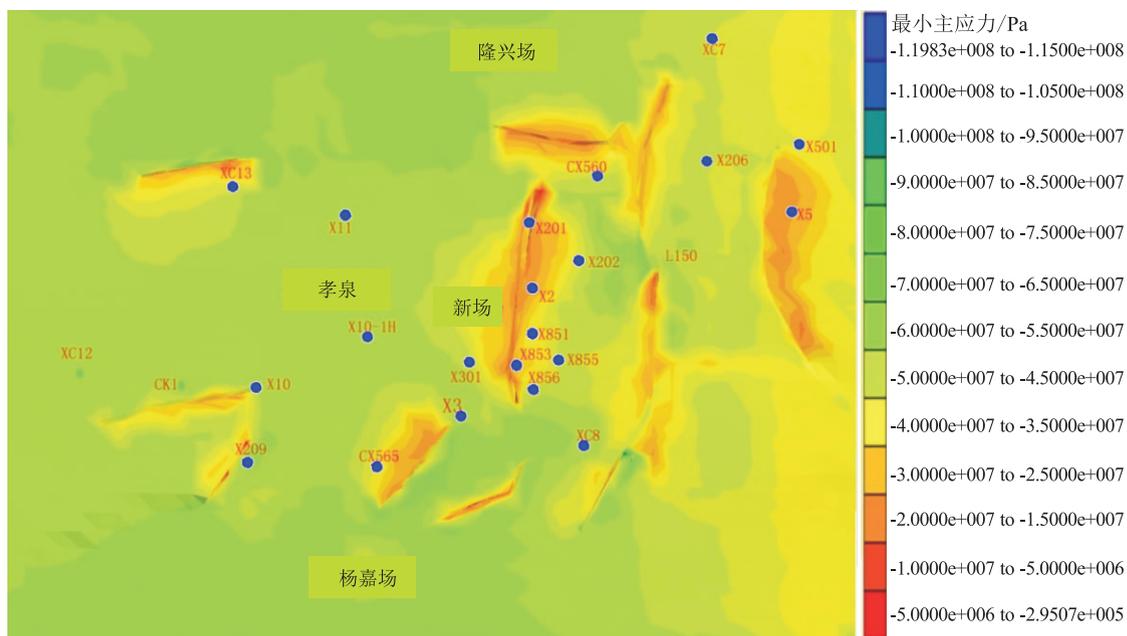


图 7 川西凹陷新场气田须家河二段第四砂组顶最小主应力等值线

Fig.7 Minimum principal stress contour of fourth sand group of second member of Xujiache Formation in Xinchang gas field, Western Sichuan Sag

### 3 结论

在地质模型、模型边界、井点现今地应力分析的基础上,采用三维数值模拟技术能较好地反演油气田的三维地应力场。研究区地形和各岩层展布相对平坦,因此区内断裂构造是影响研究区应力场分布特点的重要因素。由于均发育较多断裂构造,因此其应力场表现出明显的不连续性,在断层端部和转

折部位表现出较明显的最大主应力和剪应力集中现象,而在断层两盘部位则出现应力消散特点,最小主应力在断裂周围表现较明显的拉应力。从纵向剖面上看,研究区应力场具有较明显的分带性,具体表现为千佛崖组以上地层最大主应力方向多近于水平,应力场分布较连续;须家河组地层受断层影响,主应力方向在不同部位往往存在较大差别,尤其在断层

周围,主应力方向往往多变,应力场部分大多不连续;须家河组底板以下地层,最大主应力方向大多转为近垂直向,应力场分布也较为连续。

#### 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.  
Ma Yinsheng.The role and significance of crustal stress in petroleum geology and its present situation[J].Journal of Geomechanics,1997,3(2):41-46.
- [2] Klee G,Rummel F,Williams A.Hydraulic fracturing stress measurements in Hong Kong[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1999,36(6):731-741.
- [3] Ito T,Evans K,Kawai K,et al.Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1999,36(6):811-826.
- [4] Shin K,Sugawara K,Okubo S.Application of Weibull's theory to estimating in situ maximum stress  $\sigma_H$  by hydro fracturing[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2001,38(3):413-420.
- [5] Bell J S.Practical methods for estimating in situ stresses for borehole stability applications in sedimentary basins[J].Journal of Petroleum Science and Engineering,2003,38(3-4):111-119.
- [6] 俞言祥,许忠淮,黄雨蕊.用斜井钻孔崩落资料反演上地壳应力状态的遗传算法[J].华北地震科学,2003,18(1):1-8.  
Yu Yanxiang,Xu Zhonghuai,Huang Yurui.Inversion of upper crustal stress state with collapse data from inclined boreholes by genetic algorithms[J].North China Earthquake Sciences,2003,18(1):1-8.
- [7] Brudy M,Zoback M D.Drilling-induced tensile wall-fractures: implications for determination of in-situ stress orientation and magnitude[J].International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences,1999,36(2):191-215.
- [8] Lavrov A.The Kaiser effect in rocks:principles and stress estimation techniques[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2003,40(2):151-171.
- [9] 丁原辰,王红才,汪西海.声发射估计岩石古应力的实验研究[C]//地质力学与地壳运动:地质力学开放研究实验室1991-1992年报.北京:地震出版社,1994:43-55.  
Ding Yuanchen,Wang Hongcai,Wang Xihai.The experimental study on estimating the ancient rock stress using the acoustic emission[C]//Geological Mechanics and Crustal Movement:Geomechanics Open Research Laboratory,1991 to 1992 Annual Paper.Beijing:Seismological Press,1994:43-55.
- [10] 孙宝珊,丁原辰,邵兆刚,等.声发射法测量古今应力在油田的应用[J].地质力学学报,1996,2(2):11-17.  
Sun Baoshan,Ding Yuanchen,Shao Zhaogang,et al.Application of acoustic emission technique in determination of fossil and present-day stresses in oil fields[J].Journal of Geomechanics,1996,2(2):11-17.
- [11] 马建海,孙建孟.用测井资料计算地层应力[J].测井技术,2002,26(4):347-351.  
Ma Jianhai,Sun Jianmeng.Calculation of formation stress using logging data[J].Well Logging Technology,2002,26(4):347-351.
- [12] 钟方平,楼涛涛,张景森,等.深层地下地应力测量[J].应用力学学报,2000,17(3):59-62.  
Zhong Fangping,Lou Weitao,Zhang Jingsen,et al.Measurement of crustal stress at great depth[J].Chinese Journal of Applied Mechanics,2000,17(3):59-62.
- [13] Deng Hui.Application of three-dimensional numerical calculation to geo-stress field analysis of oil or gas reservoir[C]//2010 International Conference on Computational and Information Sciences.Chengdu:IEEE,2010:971-974.
- [14] 中石化西南油气分公司.新场构造带天然气增储领域及勘探目标评价[R].成都:中石化西南油气分公司,2012.  
Oil & Gas Field Southwest Branch of Sino Petroleum Corp.The evaluation of natural gas production addition and exploration targets in Xinchang tectonic belt[R].Chengdu:Oil & Gas Field Southwest Branch of Sino Petroleum Corp,2012.
- [15] 张红艳,谢富仁,崔效锋.四川芦山地震区域构造环境与构造应力场特征[J].地球科学与环境学报,2013,35(2):99-106.  
Zhang Hongyan,Xie Furen,Cui Xiaofeng.Regional characteristics of tectonic stress field and tectonic setting of Lushan earthquake in Sichuan[J].Journal of Earth Sciences and Environment,2013,35(2):99-106.
- [16] 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.  
Chen Yingbin,Zheng Bing,Yuan Dongshan,et al.Characteristics and main controlling factors of fractures in gas reservoir of Xujiache Formation,Dayi Structure[J].Petroleum Geology & Experiment,2013,35(1):29-35.
- [17] 成都理工大学.新场须二段地应力与裂缝分布规律研究[R].成都:成都理工大学,2013.  
Chengdu University of Technology.The research on geostress and fracture distribution regulation of the second member of Xujiache Formation in Xinchang[R].Chengdu:Chengdu University of Technology,2013.
- [18] 梁利喜.深部应力场系统评价与油气井井壁稳定性分析研究[D].成都:成都理工大学,2008.  
Liang Lixi.Research on deep in-situ stress field and wellbore stability[D].Chengdu:Chengdu University of Technology,2008.
- [19] 张守仁,万天丰,陈建平.川西坳陷孝泉—新场地区须家河组二—四段构造应力场模拟及裂缝发育区带预测[J].石油与天然气地质,2004,25(1):70-74,80.  
Zhang Shouren,Wan Tianfeng,Chen Jianping.Tectonic stress field modeling and fracture prediction in  $T_3x^{2-4}$  strata in Xiaoquan-Xinchang area, western Sichuan depression[J].Oil & Gas Geology,2004,25(1):70-74,80.