

doi: 10.12029/gc20230306005

黄滔, 刘岩, 何建华, 叶泰然, 邓虎成, 李瑞雪, 李可赛, 张家维. 2024. 川西孝泉—丰谷地区须二段深层致密砂岩储层地应力大小评价方法及其工程应用[J]. 中国地质, 51(1): 89–104.

Huang Tao, Liu Yan, He Jianhua, Ye Tairan, Deng Hucheng, Li Ruixue, Li Kesai, Zhang Jiawei. 2024. Evaluation method and engineering application of in-situ stress of deep tight sandstone reservoir in the second member of Xujiahe Formation in Xiaoquan–Fenggu area, western Sichuan[J]. Geology in China, 51(1): 89–104(in Chinese with English abstract).

川西孝泉—丰谷地区须二段深层致密砂岩储层地应力大小评价方法及其工程应用

黄滔¹, 刘岩^{1,2}, 何建华^{1,2}, 叶泰然³, 邓虎成^{1,2}, 李瑞雪^{1,2}, 李可赛^{1,2}, 张家维¹

(1. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059; 2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 成都理工大学, 四川 成都 610059; 3. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041)

摘要:【研究目的】川西拗陷孝泉—丰谷地区须二段砂岩气藏的勘探开发潜力巨大, 但该地区埋藏较深且构造复杂、断缝系统多期叠加, 使得地应力频繁变化, 制约了该区井位轨迹设计与压裂改造的有效实施, 故需对该区地应力大小进行精细评价, 为工程开发提供建议从而提高产能。【研究方法】基于岩石力学、声发射实验及差应变分析等实验测试方法, 并结合常规测井、特殊测井及水力压裂等资料分析, 优选了适应于深层块状均质致密砂岩储层的地应力大小实验测试方法, 并在单点地应力大小准确评价的基础之上, 构建了研究区分构造变形单元分层的单井地应力大小连续测井解释模型, 查明了纵向上地应力大小变化结构类型及分布规律。【研究结果】研究表明差应变分析法计算的地应力大小精确度最高, 为更能够准确表征深层均质块状致密砂岩地应力大小的实验方法。测试结果显示须二段属于Ⅲ类地应力类型, 处于走滑应力状态, 存在部分逆冲挤压应力状态; 在井点测试的基础上, 形成了基于井壁影像反演的地应力大小评价技术; 地应力大小结构变化在纵向上分为 5 种类型, 其中南北向(SN)三级以上断层和南北向(SN)褶皱或北东东向(NEE)褶皱变形的高部位以低低高(LLH)型和低应力(LC)型为主, 在小规模断层或平缓构造区以高低高(HLH)型或高低低(HLL)型为主。【结论】建议选择低低高(LLH)型地应力剖面进行工程开发, 其纵向上可穿透更多含气层, 同时避开底层底水, 预防生产早期快速见水, 故应选择二—三级南北向断层和南北或北东东向纵弯褶皱区须二 2 中上段进行水力压裂改造。

关键词: 地应力大小; 应力结构; 致密气藏; 声发射; 诱导缝; 须二段; 油气勘查工程; 川西凹陷; 四川

创新点: 形成了基于井壁影像反演的地应力大小评价技术; 结合不同地应力剖面类型和水力压裂缝形态对须二段进行储层改造。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0089-16

Evaluation method and engineering application of in-situ stress of deep tight sandstone reservoir in the second member of Xujiahe Formation in Xiaoquan–Fenggu area, western Sichuan

收稿日期: 2023-03-06; 改回日期: 2023-05-23

基金项目: 深地科学与工程教育部重点实验室开放基金项目(DESEYU202102)与四川省科技厅重点苗子项目(22MZGC0159)联合资助。

作者简介: 黄滔, 男, 1998 年生, 硕士生, 主要从事非常规油气储层地应力场精细描述研究; E-mail: 1136830431@qq.com。

通讯作者: 刘岩, 女, 1983 年生, 副教授, 主要从事储层特征及储层评价技术研究; E-mail: liuyan08@cdu.cn。

HUANG Tao¹, LIU Yan^{1,2}, HE Jianhua^{1,2}, YE Tairan³, DENG Hucheng^{1,2},
LI Ruixue^{1,2}, LI Kesai^{1,2}, ZHANG Jiawei¹

(1. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Exploration and Development Research Institute of Sinopec southwest oil and gas company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: This paper is the result of oil and gas exploration survey engineering.

[Objective] Xiaoquan–Fenggu area in the western Sichuan Basin has huge potential for exploration and development of Xujiahe Formation gas reservoirs. However, due to the region's deep burial, complex structure, and multiple superimposed fault systems that cause frequent variation in stress orientation, effective well placement design and hydraulic fracturing practices have been limited. Therefore, it is necessary to evaluate the precise magnitude of in–situ stress in this area to provide recommendations for engineering development and increase production capacity. **[Methods]** Experimental methods such as rock mechanics, acoustic emission testing, and differential strain analysis combined with conventional logging, special logging, and hydraulic fracturing data were used to experimentally test the in–situ stress magnitude in deep heterogeneous blocky tight sandstone reservoirs. Based on accurate evaluation of single–point in–situ stress magnitude, a logging interpretation model was established for the subdivision of tectonic units in the study area, examining structural variation of in–situ stress magnitude and distribution along a single well. **[Results]** Our study showed that differential strain analysis provided the most accurate measurement of stress in heterogeneous tight sandstone reservoirs. Test results indicated that the Xujiahe Formation belongs to the type III in–situ stress category and exists in a strike–slip stress state with partial compression and thrust stress states. Based on single–point test data, we developed a technique to evaluate in–situ stress magnitude by utilizing borehole image inversion. Structural changes in in–situ stress magnitude were divided vertically into five types, whereby high positions of north–south (SN) faults with grades above three and folds in SN or northeast–trending (NEE) resulted predominantly in low–low–high (LLH) or low stress (LC) profiles. Meanwhile, small–scale faults or gentle deformation areas had high–low–high (HLH) or high–low–low (HLL) profiles. **[Conclusion]** A low–low–high (LLH) stress profile was suggested for engineering development to penetrate more gas layers vertically, while avoiding bottom water and preventing rapid water breakthrough during early production. Therefore, it is recommended to select the second to third order north–south(SN) trending faults and north–south(SN) or northeast trending(NE) longitudinal flexure zones located in the middle–upper part of the second layer of the second member of Xujiahe Formation.

Key words: in situ stress; stress structure; tight gas reservoir; acoustic emission; induction seam; the second member of Xujiahe Formation; oil and gas exploration engineering; western Sichuan Depression; Sichuan Province

Highlights: The in–situ stress evaluation technology based on borehole wall image inversion is formed. Combined with different in–situ stress profile types and hydraulic fracture morphology, the reservoir reconstruction of the second member of Xujiahe Formation was carried out.

About the first author: HUANG Tao, male, born in 1998, master candidate, engaged in the study of fine description of the in–situ stress field; E–mail: 1136830431@qq.com.

About the corresponding author: LIU Yan, female, born in 1983, associate professor, mainly engaged in reservoir characteristics and reservoir evaluation technology; E–mail: liuyan08@cdut.cn.

Fund support: Supported by the Open Found from Key Lab of Deep Earth Science and Engineering, Ministry of Education (No.DESEYU202002), Sichuan Provincial Science and Technology Department Key Seedling Project (No.22MZGC0159).

1 引 言

随着常规油气藏向非常规油气藏勘探开发的理念转变,致密气、页岩气、煤层气等非常规油气资

源展现出巨大潜力,全球能源的供应格局也逐渐开始发生变化(贾承造等, 2012; 邱振等, 2013; 邹才能等, 2018; 李国欣等, 2022)。致密气、页岩气的勘探开发,使得美国天然气探明储量自 2002 年的

$4.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 增加到 2008 年的 $6.86 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 增幅近 40%。中国非常规油气的发展也非常迅速, 其中尤以致密砂岩气的勘探开发为代表。随着油气藏开发技术的不断革新, 各地陆续发现大型的致密气田, 致密气的储量、产量也不断增加, 其已成为当前中国最现实的非常规天然气资源(邹才能等, 2012; 戴金星等, 2012; 贾承造等, 2012; 张抗等, 2022)。其中四川盆地须家河组致密砂岩气的勘探也获得重要进展, 累计探明天然气地质储量超过 $1.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (戴金星等, 2012)。中国石化在川西深层须家河组探明储量为 $1773 \times 10^8 \text{ m}^3$, 然而, 由于须家河组处于地质构造复杂并且构造应力很高的深层, 因此储层加砂量低、难于压裂, 导致致密气可动用储量较低(张金才等, 2021; 郑和荣等, 2021)。为了增加储层的可动用储量, 急需对须家河组致密砂岩的地应力及岩石力学特征进行研究, 为储层压裂改造的设计与施工提供科学依据。

目前地应力测量方法大致分为两类, 即直接测量法和间接测量法。直接测量法有扁千斤顶法、水力压裂法和声发射法等; 间接测量法有套芯应力解除法、应变恢复法等(蔡美峰, 1993; 张重远等, 2012)。上述方法通常成本较高、不能刻画大范围内的连续性地应力大小, 且其大多不适用于深部地层地应力测量, 因此, 优选适用于深层致密砂岩储层的地应力大小测量方法具有重要意义(石林等, 2004; 印兴耀等, 2018; 何建华等, 2023)。由于构造应力场演化和叠加, 地层中可能形成大量裂缝, 且纵向上应力会发生明显变化, 因此, 在开发过程中应关注裂缝、区域构造等与应力的耦合作用对油气运移和成藏的影响, 探讨区域构造与应力耦合如何影响工程应用, 同时, 在进行储层改造时, 明确地应力对裂缝拓展的机理是十分必要的(朱海燕等, 2021; 尹帅等, 2022, 2023)。

对于川西坳陷孝泉—丰谷地区须二段致密砂岩气储层的地应力评价研究, 本文主要利用岩石声发射法和差应变分析法对研究区地应力大小进行评价, 同时优选出地应力大小更准确的实验结果, 并以实验测试的散点数据对连续性测井解释的地应力大小进行校正。基于地应力大小评价结果, 进一步探讨了研究区须二段地应力大小的纵向结构特征, 以期为该区的实际开发提出工程建议。

2 研究区概况

研究区位于川西坳陷中段孝泉—新场—丰谷隆起带, 区内发育多组北北东向的复式背斜, 东侧伴生大量逆断层, 构造变形复杂。多期构造叠加致使研究区断裂相互切割, 交切关系复杂, 断缝体内多期多成因裂缝相互组合呈网状, 致使须二气藏内地应力扰动频繁且复杂。基于构造解释和地震解释结果, 将该区从西向东依次划分为新场—合兴场—丰谷 3 个区块(图 1), 其构造变形单元主要为: 南北向主体构造, 其构造变形样式为南北向单断褶皱型, 北东向逆冲断层型, 该类构造样式是研究区的主要构造样式, 占据 80%, 主要在喜山期新场; 构造转换调节带, 表现为东西, 南北, 北东向单断褶皱型(图 2), 双断背冲型, 东西与南北向复合穹隆状纵弯褶皱型, 该区构造复合明显, 其主要在印支中晚期形成, 经历了燕山中晚期和喜山期的多期改造; 东西向主体构造带, 其构造变形样式为东西, 北东向单断褶皱型或逆冲断层型, 东西与北东向复合宽缓纵弯褶皱型, 该区构造形成时间最早, 经历了燕山中晚期弱改造。研究区须二段断裂整体较发育, 主要发育近南北、东西向两组不同走向的逆断层。按照区域断层分级标准, 可分为二、三、四、五、六级断裂。其中新场—合兴场地区断裂发育、规模较大, 近南北向控藏四级断裂主要发育在该区; 丰谷地区主要发育东西向断裂, 南北向断裂不发育。

须二段岩性以细—中粒砂岩为主, 岩石类型较多, 纵向分布差异明显; 研究区储层基质物性较差, 孔隙度一般小于 7%, 只有少数孔隙度大于 10%; 基质渗透率也较低, 多数小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。总体而言, 研究区须二段成物性较差, 属于典型低孔低渗致密—超致密储层。须二段纵向上可划分为 10 个小层, 而优质层段是须二 1(TX₂¹), 须二 2(TX₂²) 及须二 4(TX₂⁴), 本次将重点研究以上 3 个层段的地应力特征, 并兼顾其他小层。

3 样品制备与实验方法

研究采用声发射实验和差应变分析法对样品进行地应力大小的测定。

声发射实验需沿钻井岩心轴向钻取一块岩样(图 3), 若为直井, 则可确定垂向主应力; 沿水平方向钻取增量为 45° 的 3 块岩样, 并测出这 3 个方向

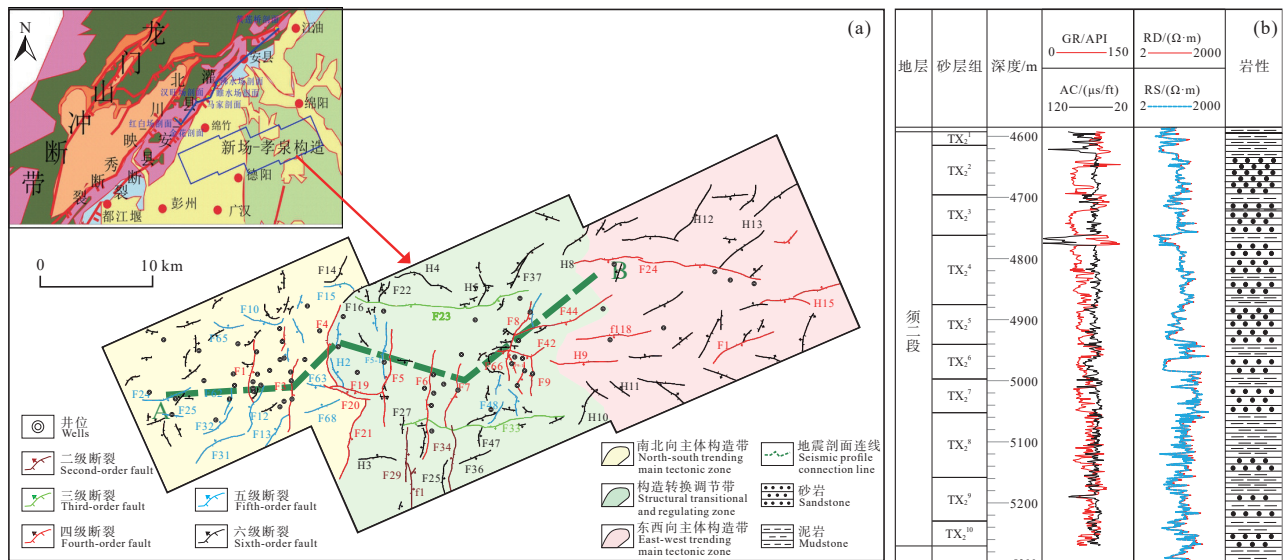


图1 新场—合兴场—丰谷地区 TX₂² 断层平面分布图及地层特征

a—断层平面分布图; b—须二段砂层组划分剖面图(Xinshen 1井)

Fig.1 TX₂² fault plane distribution and stratigraphic characteristics in Xinchang–Hexingchang–Fenggu area
a–Plane distribution diagram of faults; b–Section diagram of sand group division of the Xu 2 member (Xinshen 1 well)

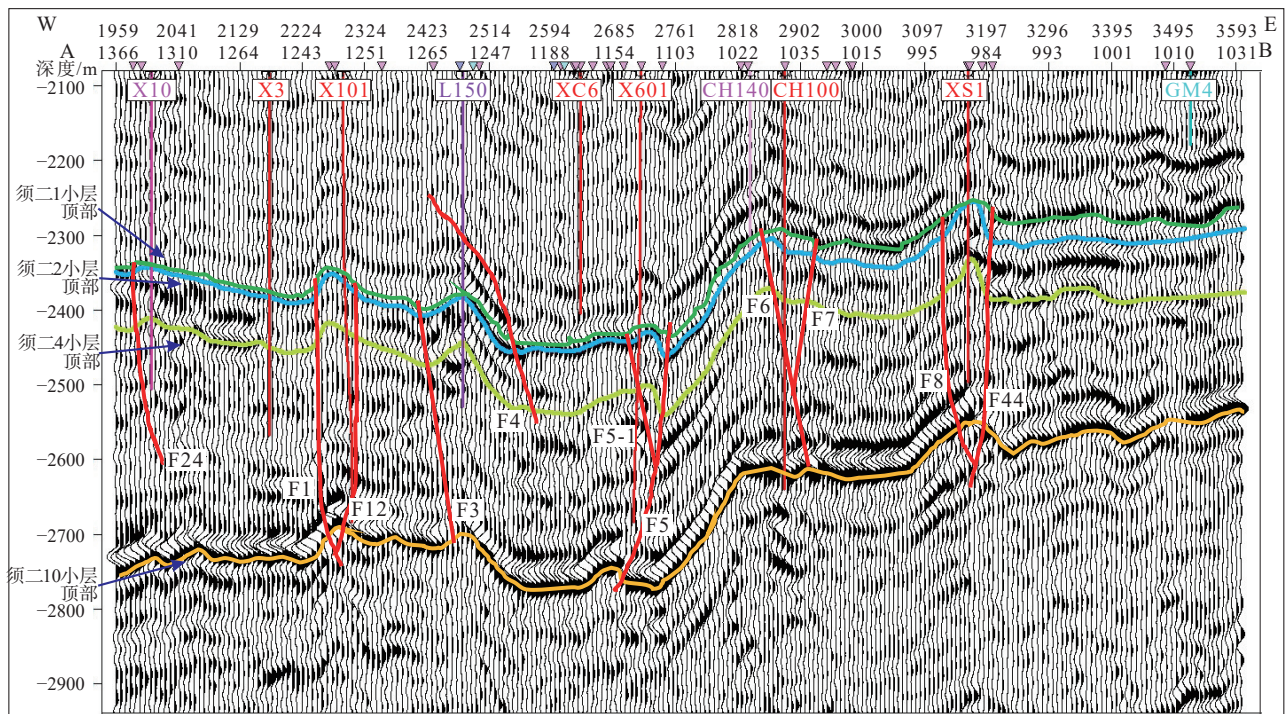


图2 新场—合兴场—丰谷地区南西—北东向地震剖面解释

Fig.2 Interpretation of southwest–northeast seismic profile in Xinchang–Hexingchang–Fenggu area

的正应力,进而求出水平最大主应力和水平最小主应力;将其实验样品加工为 φ 25 mm×50 mm 的圆柱形试件,待试件钻取、磨光成形后,两个端面需手工精磨,从而保证其平行度、平整度及垂直度都满

足试件的岩石力学实验标准(付小敏和王旭东, 2007)。本次研究在成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室采用 RTR-1000 三轴伺服测试系统和 SAEU2S 声发射检测系统对研究区

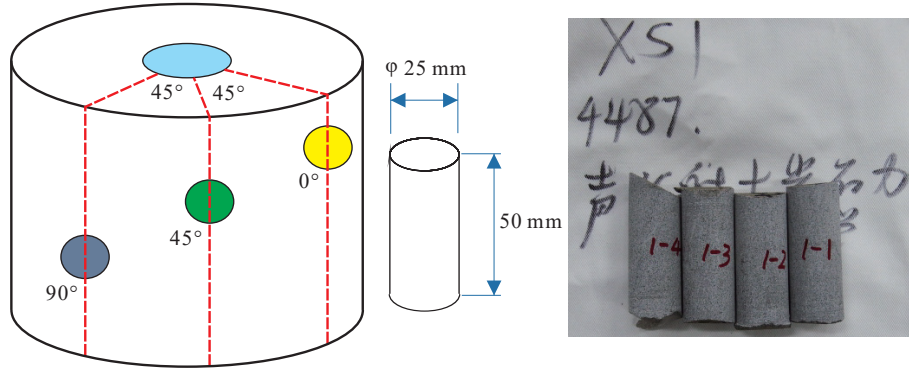


图 3 声发射岩心取样示意图及 XS1 井声发射实验试件
Fig.3 Schematic diagram of acoustic emission test core sampling and XS1 well test specimen

5 口井的 5 组砂岩样品进行实验。该实验利用岩石对曾经在地层条件下所受到的最大外载荷具有记忆性的特点, 在记录单轴多级加载条件下岩石产生的声发射信号时, 可根据声发射信号的几个急剧变化点(即 Kaiser 效应点)来确定不同级别的应力分量, 进而确定各个方向的地应力大小(姜永东等, 2005; 王小琼等, 2011)。

差应变测试则是需将现场取回的岩心加工为 50 mm×50 mm×50 mm 的立方体试件(图 4), 并在 3 个相互正交的平面内各贴上 3 个成 45°的应变片, 将试件密封后放入压力舱中实验, 增加围压直至超过原地层压力, 而此时由应变实验所测量的应变值即为三向地应力各自的应变值, 结合弹性力学计算出三向地应力之间的比值, 再使用密度测井等方法计算出垂向主应力, 即可推算出岩心在该处三向地

应力的大小(程远方等, 2008; 沈海超等, 2008)。该实验是在中国石化石油工程技术研究院采用差应变测量系统进行, 该系统由液压泵, 传感器控制箱及功控主机, 压力室, 电脑控制系统、传感器、连接线缆等部分组成, 应变在整个加压/卸压过程中的实验数据会以图像的形势反映到显示界面。

4 地应力大小的实验结果与评价

4.1 声发射实验结果与校验

本文通过采取 AE 振铃计数-时间关系图的数据激增点与累计能量对数-时间曲线中的数据突变点相结合的方式判断 Kaiser 效应点(图 5)。但实验过程存在着测量精度不高, Kaiser 效应点的确定具有一定主观性, 不同岩石的 Kaiser 效应点可能具有方向性效应等问题(程远方等, 2008; 沈海超等,

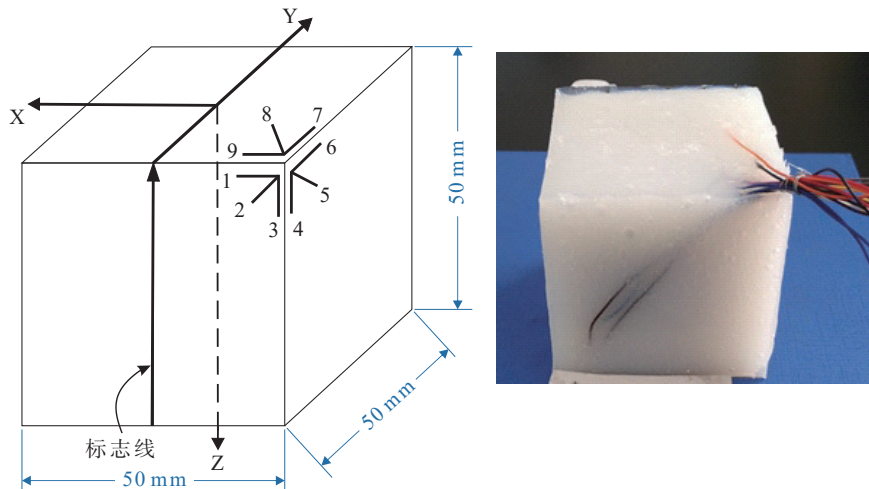


图 4 差应变实验的试件及应变片贴法示意图
Fig.4 Schematic diagram of specimen and strain gauge sticking method for differential strain test

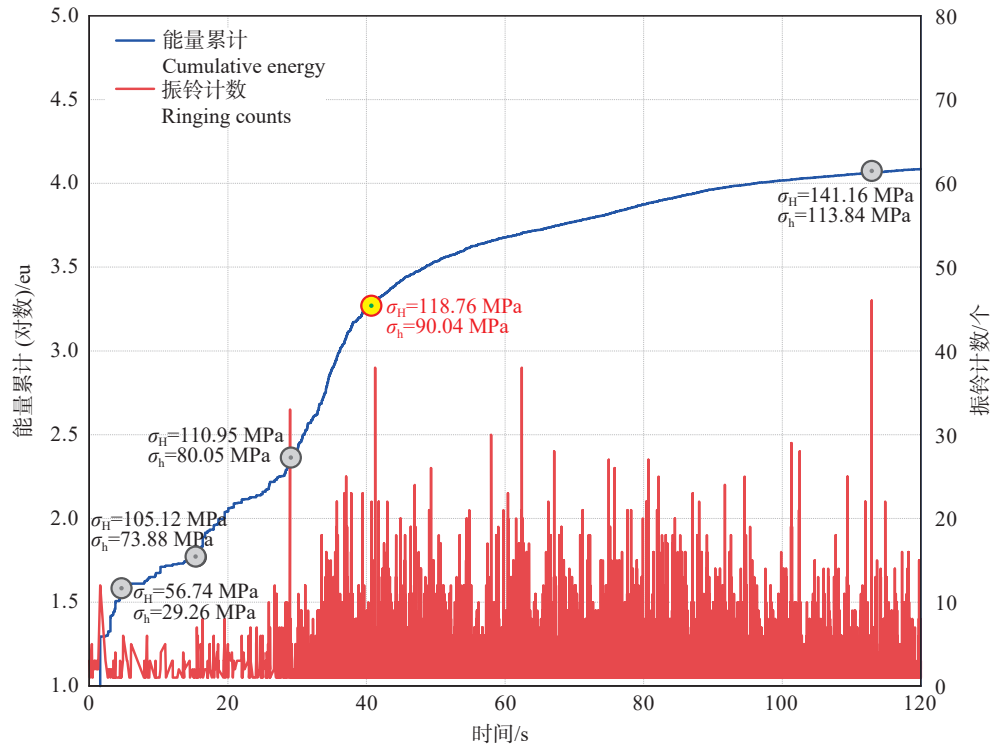


图5 XS1井4487 m, 1-S4号样品累计能量对数、振铃计数与到达时间关系图

Fig.5 The relationship between cumulative energy logarithm, ringing count and arrival time of No.1-S4 sample at 4487 m in Well XS1

2008)。为了确定现今地应力大小所对应的 Kaiser 效应点,本次研究利用了水力压裂资料对声发射现今 Kaiser 效应点进行标定,以期进一步提高声发射实验的精度。

水力压裂资料确定地应力大小的方法是目前最直接、最可靠的方法之一(刘亚群等, 2007; 赵刚和董事尔, 2009; Schmitt et al., 2012; 王成虎等, 2020)。通过对研究区压裂资料的整理分析(表1),发现其地应力大小主体以走滑应力状态为主,而局部东西向断裂复杂区的井则以逆断层应力状态为主。

以XS1井为例,应用水力压裂资料解释了研究区地应力大小,并标定了岩石声发射实验测试的第4个序列对应研究区的现今地应力大小(图5)。

通过以上步骤,利用水力压裂资料校正后的5组声发射样品所测三向地应力表明:最大水平主应力值为118.76~144.01 MPa,平均值为132.77 MPa;最小水平主应力值为90.04~109.79 MPa,平均值为100.73 MPa;垂向主应力值为110.71~129.56 MPa,平均值为122.68 MPa(表2)。认为研究区的三向应力值较大,且须二段各小层之间的三向应力具有最大水平主应力>垂向主应力>最小水平主应力的特

征,属于Ⅲ类地应力类型,为走滑应力状态。

4.2 差应变实验测试

差应变分析法所测三向应力实验结果表明(刘向君, 2008^①),水平最大主应力值为135.09~148.86 MPa,均值为140.66 MPa。水平最小主应力值为100.65~107.93 MPa,均值为104.012 MPa。垂直主应力为111.87~125 MPa,均值为117.96 MPa(表3)。三向应力之间的表现为最大主应力>垂向主应力>最小主应力,为走滑应力状态(图6)。

4.3 深层致密砂岩地应力大小实验结果对比与优选

以水力压裂资料计算的较为准确的最小水平主应力为标准,对声发射实验和差应变分析法的地应力大小实验结果进行对比分析(图7),结果显示:同等深度条件下,声发射实验结果普遍偏大,差应变分析法与工程资料更加接近,认为差应变更适合于各向异性较弱的均质块状致密砂岩储层地应力大小的评价。

5 地应力大小的测井连续性评价

5.1 基于井壁影像特征进行地应力大小评价

5.1.1 诱导缝形态反演地应力大小

由于地应力差异,在本研究区可见等轴凹面或

表 1 水力压裂法计算的地应力大小的数据结果

Table 1 Results of the magnitude of in-situ stress calculated using hydraulic fracturing

井号	层位	测试段中深/m	最大主应力/MPa	最小主应力/MPa	垂向主应力/MPa	井所在构造位置
CH127	须二	4581.50	141.35	101.35	114.61	F6上盘
GM2	须二1	4713.00	146.99	122.99	116.51	F23上盘
GM2	须二2	4776.00	150.31	122.31	116.19	F23上盘
GM2	须二3	4845.00	149.87	109.87	118.82	F23上盘
GM3	须二3	4920.00	157.31	125.31	121.15	H7上盘
GM4	须二4	4882.00	153.06	113.06	113.98	F44上盘
X10	须二2	4717.00	138.68	103.00	117.99	F24上盘
X10	须二6	5042.00	153.00	112.40	125.92	F24上盘
X10-2	须二2	4732.00	143.96	83.96	111.41	新场构造七郎庙高点
X10-2	须二4	4880.00	154.18	94.18	114.89	新场构造七郎庙高点
X10-2	须二4	4851.50	154.22	94.22	114.22	新场构造七郎庙高点
X11	须二4	4917.00	145.00	113.00	121.45	新场构造七郎庙高点北翼
X209	须二4	4868.00	153.66	104.46	124.16	新场构造七郎庙高点
X5	须二3	4880.00	155.05	107.05	119.68	F4上盘
X8-1H	须二2	4880.00	141.92	101.52	117.29	F3下盘
XC12	须二8	5250.13	162.31	102.31	128.76	孝泉构造
XS1	须二1	4496.00	127.37	87.37	112.03	F8上盘
XS101	须二1	4598.00	144.79	112.79	114.12	F9-1上盘
XS101	须二2	4807.00	149.07	109.07	120.25	F9-1上盘
XS101	须二2	4786.00	150.43	110.43	118.79	F9-1上盘
XS101	须二2	4709.00	144.63	104.63	115.49	F9-1上盘
XS101	须二2	4634.00	143.50	103.50	112.29	F9-1上盘

表 2 孝泉—丰谷地区须二段声发射实验测试的三向应力值的测试结果数据

Table 2 Test results of the three-direction stress value of the acoustic emission test of the second member of the Xuxujiahe Formation in the Xiaoquan-Fenggu area

井号	层位	井深/m	Kaiser点应力值/MPa				最大主应力/MPa	最小主应力/MPa	垂向主应力/MPa
			0°	45°	90°	垂直			
XS1	须二1	4487.00	101.33	82.10	88.62	101.29	118.76	90.04	110.71
X11	须二2	4762.24	116.16	92.74	99.78	119.56	135.26	100.68	129.56
CG561	须二4	4943.80	112.74	89.51	97.28	109.74	132.71	98.07	120.12
XC12	须二4	4766.83	111.67	95.32	106.53	114.13	133.13	105.09	124.14
X501	须二6	5270.70	120.87	99.48	110.79	117.80	144.01	109.79	128.87

凸面、鞍形、花瓣状、中心线瓣状 4 种类型的诱导缝, 基于岩石力学实验结果, 差应力系数与诱导缝端面形态之间具有以下关系(图 8): 当差应力系数小于 0.3 时, 诱导缝形态是等轴凹面和凸面型; 当差应力系数在 0.30~0.35 时, 诱导缝形态基本是马鞍形; 当差应力系数在 0.35~0.40 时, 诱导缝形态基本是花瓣状; 当差应力系数大于 0.4 时, 诱导缝形态基本是沿中心线对称的瓣状; 且研究区多以马鞍形和花瓣状诱导缝为主, 水平两向差应力在 35~40 MPa。本文在此基础上, 结合岩心诱导缝端面尺寸的变化量(Ziegler and Valley, 2021), 可估算出地应力大小。

在垂直钻孔情况下, 岩心诱导缝端面上可发现其具有明显槽面(图 9a), 槽面最低点和最高点分别关于岩心轴向线对称且最低点连线与最高点连线之间互相垂直, 最低点连线和最高点连线分别代表最大水平主应力和最小水平主应力的方向。岩心

在地下取出前受水平两向地应力控制在钻孔内为半径为 d_0 的圆形, 而取出后岩心所受围压消失, 岩心径向膨胀。应力释放后, 最大水平主应力方向半径变化为 d_{max} , 最小水平主应力方向半径变化为 d_{min} (图 9b)。基于岩心端面尺寸、岩石力学参数和差应力系数, 水平地应力大小可根据以下公式计算:

$$\Delta S = \sigma_H - \sigma_h = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_0} \cdot \frac{E}{1 + \mu} \approx \frac{\Delta d}{d_{min}} \cdot \frac{E}{1 + \mu} \quad (1)$$

$$K_H = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_h} \quad (2)$$

式中, ΔS 为水平两向差应力, MPa; σ_H 为最大水平主应力, MPa; σ_h 为最小水平主应力, MPa; d_0 为岩心钻孔取出前的原始半径, mm; d_{max} 为岩心膨胀后椭圆岩心端面的长轴, mm; d_{min} 为岩心膨胀后椭圆岩心端面的短轴, mm; Δd 为 d_{max} 与 d_{min} 之

表 3 孝泉—丰谷地区须二段差应变实验测试的三向应力值的测试结果数据

Table 3 Test results of triaxial stress value of the second member of Xujiahe Formation in Xiaoquan–Fenggu area

井号	层位	深度/m	三向主应力/MPa		
			最大主应力	最小主应力	垂向主应力
CX560	须二2	4810.97	141.00	102.00	125.00
CH127	须二1	4566.14	135.09	100.65	111.87
CH127	须二2	4639.29	137.60	104.72	113.66
X10	须二4	4882.06	148.86	107.93	119.61
X10	须二4	4884.04	140.75	104.76	119.66

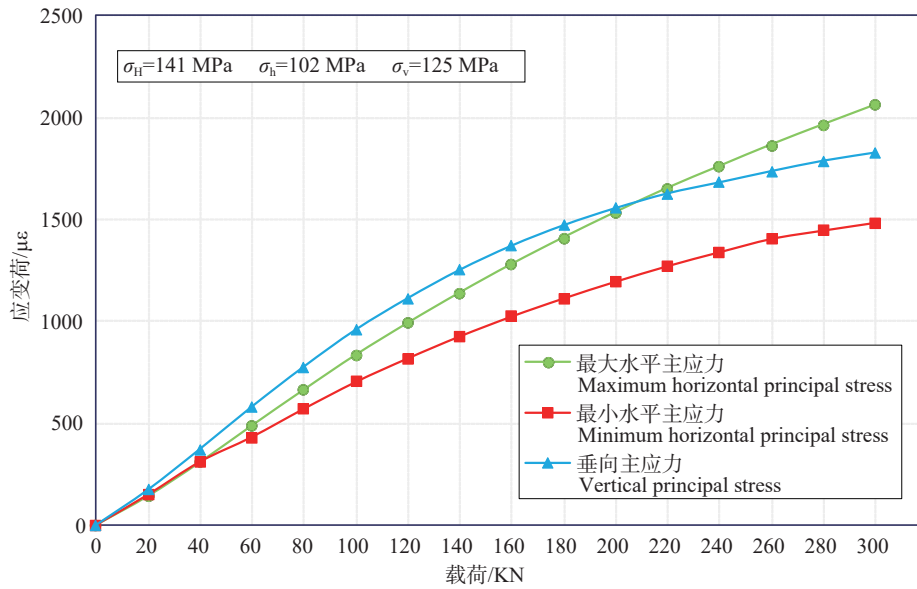


图 6 CX560 井差应变结果图
Fig.6 CX560 Well differential strain results

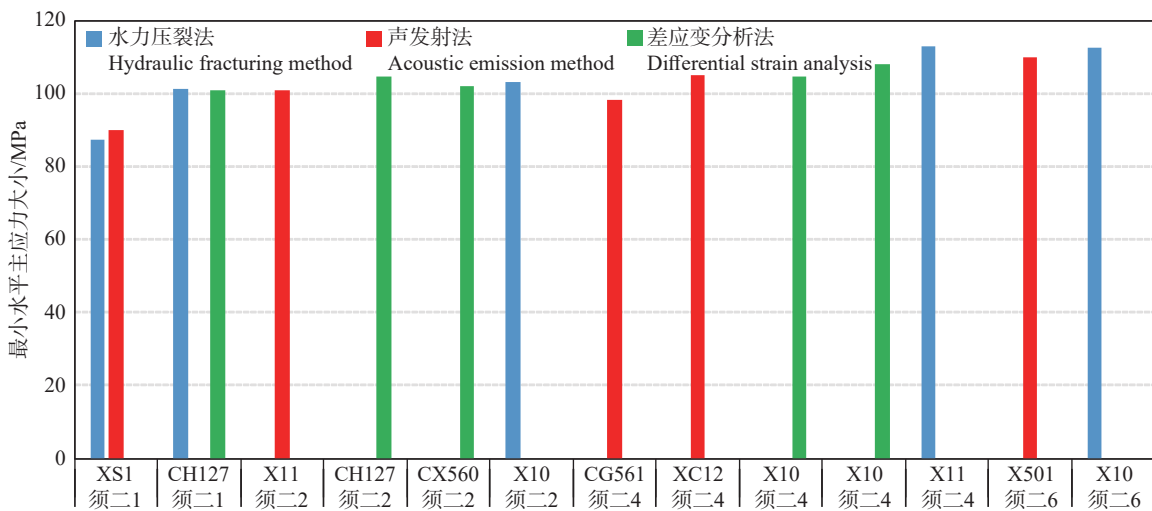


图 7 多种方法计算单点最小水平主应力值对比图
Fig.7 Comparison of various methods to calculate the minimum horizontal principal stress value of single point

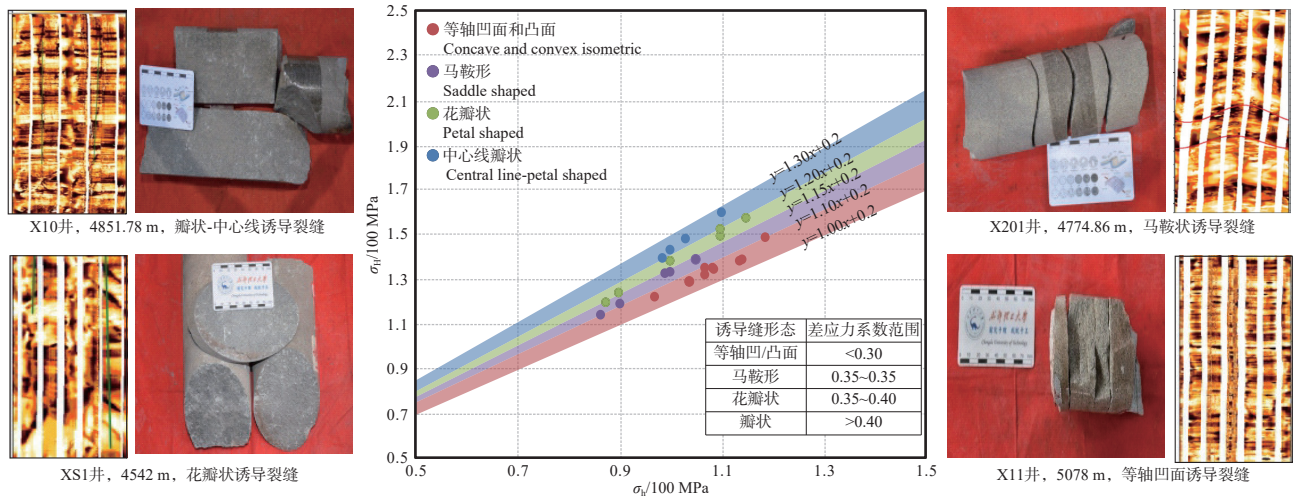


图 8 诱导缝形态与差应力系数之间的关系图

Fig.8 Diagram of the relationship between induced fracture morphology and differential stress coefficient

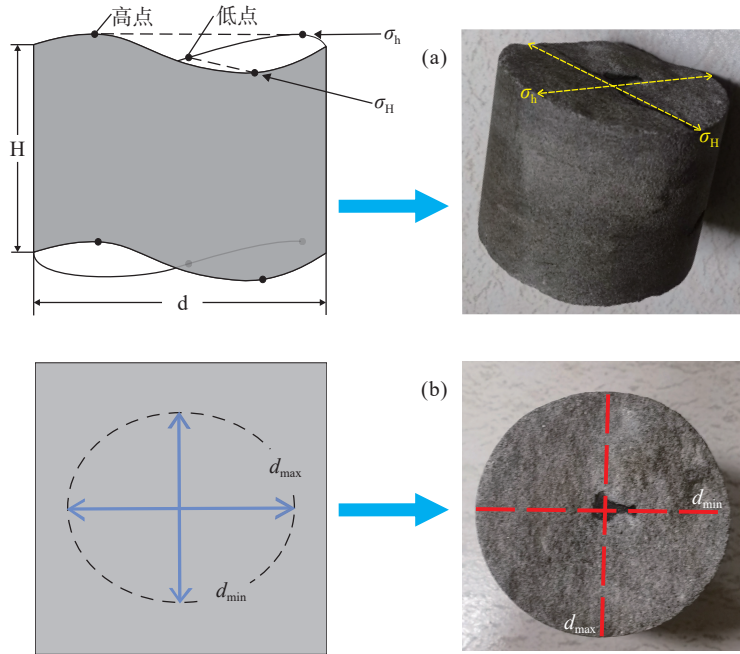


图 9 鞍形诱导缝岩心示意图及 X10 井岩样照片

Fig.9 Saddle induced fracture core diagram and X10 well rock sample photos

差, μm ; E 为岩石弹性模量, GPa ; μ 为岩石泊松比, 无量纲; K_H 为差应力系数, 无量纲。

以 X10 井含诱导缝的全直径岩样为例, 该样品端面为马鞍形, 测量其最大水平主应力和最小水平主应力方向的径长, 结合相应的岩石力学参数, 代入公式 1 和公式 2, 计算出了该岩样最大水平主应力和最小水平主应力值(表 4)。该方法与利用实验测试所测量的地应力大小结果基本一致。

5.1.2 井壁崩落宽度反演地应力大小

利用应力多边形和钻孔崩落法, 可反演出地应力大小(图 10, Zoback et al., 2003; 王璞等, 2019)。其中两条红色斜线代表井壁崩落宽度(WBO)和单轴抗压强度(EUCS)对最大水平主应力和最小水平主应力限定范围, 蓝色斜线代表钻井诱导张裂缝(DITF), 若存在井壁崩落的同时, 钻井诱导张裂缝也存在, 则可二次约束应力量值范围, 即位于 DITF

表4 研究区样品地应力大小计算实例

Table 4 Calculation example of in-situ stress of samples in the study area

样品编号	深度/m	诱导缝形态	差应力系数	端面尺寸/mm		$\Delta d/\mu\text{m}$	弹性模量/GPa	泊松比	最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/MPa
				d_{max}	d_{min}					
X10井	4928.92	马鞍形	0.25~0.30	69.207	69.157	50	45.359	0.182	120.23~138.72	92.48~110.98

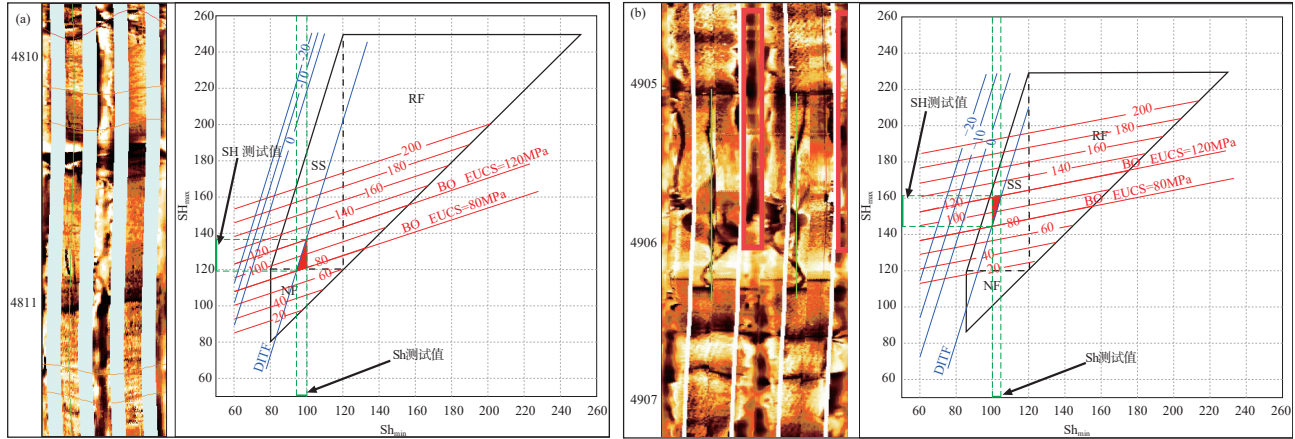


图10 不同崩落宽度下水平应力量值示意图

a—CG561井, 4810.00 m, 崩落宽度 20°; b—X10井, 4905.20 m, 崩落宽度 40°

Fig.10 Schematic diagram of horizontal stress value under different caving widths

a—CG561 well, 4810.00 m, caving width of 20°; b—X10 well, 4905.20 m, caving width of 40°

左侧;反之,应力量值约束范围位于 DITF 右侧(陈念等, 2021)。以 CG561 井和 X10 井为例,两者分别为井壁崩落、井壁崩落且伴随着钻井诱导缝的情况,通过计算可得到对应层位两向水平主应力值的范围;其与实验测试同层位相当深度情况下的地应力值基本吻合。

该研究区的井壁崩落宽度(WBO)主要在 20°~50°,且与水平两向差应力系数之间存在明显正相关,差应力系数普遍较大(高于 0.3)(图 11)。由此认为,水平两向差应力对井壁垮塌程度影响较大,仅仅在两向差应力系数较大(>0.35)的层段可以发现较明显的井壁崩落现象。

5.2 交叉偶极子阵列声波测井评价地应力大小

采用实验方法测量地应力时,样品钻取会造成岩心缺失,同时地应力实验分析成本较高,且所取样品为离散点,只能以点概面反映有限深度范围内的地应力大小,但对整个剖面地应力的变化情况仍不够准确。而测井资料有着连续性好,分辨率高的特点,因此可采用测井资料得到目的层的连续地应力剖面(Mao et al., 2019)。以上述优选的离散点地应力大小评价结果为基准,考虑地层各向异性,在本研究区采用黄氏模型测井解释地应力大小,该模

型认为深部地层的原岩应力是由上覆岩层应力和水平方向的构造残余应力叠加而成(黄荣樽和庄锦江, 1986)。其对中国常见的深部地层三向应力关系为走滑应力状态的地层解释效果较好,应用也较为普遍。其基本原理如公式(3):

$$\sigma_v = \int_0^H \rho(h) \cdot g \cdot dh$$

$$\sigma_H = \left(\frac{\mu}{1-\mu} + A \right) (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p \quad (3)$$

$$\sigma_h = \left(\frac{\mu}{1-\mu} + B \right) (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p$$

式中: σ_H 、 σ_h 为最大、最小水平主应力,MPa; σ_v 为垂向主应力,MPa;A、B反映水平方向上构造应力大小的两个系数,无量纲; μ 为泊松比,无量纲; P_p 为地层孔隙压力,MPa; α 为 Biot 系数,无量纲。

其中,A、B可根据水力压裂法、声发射法和差应变分析法等所求取的水平两向主应力进行反算。综合以上多源数据解释的地应力大小,反演了研究区的构造应力系数 A、B(表 5),计算结果显示,构造应力系数在平面上的分区特征明显,这与新场—丰谷地区的构造地质变形特征相关,合兴场地区经历了印支期—喜山期多期构造叠加,构造变

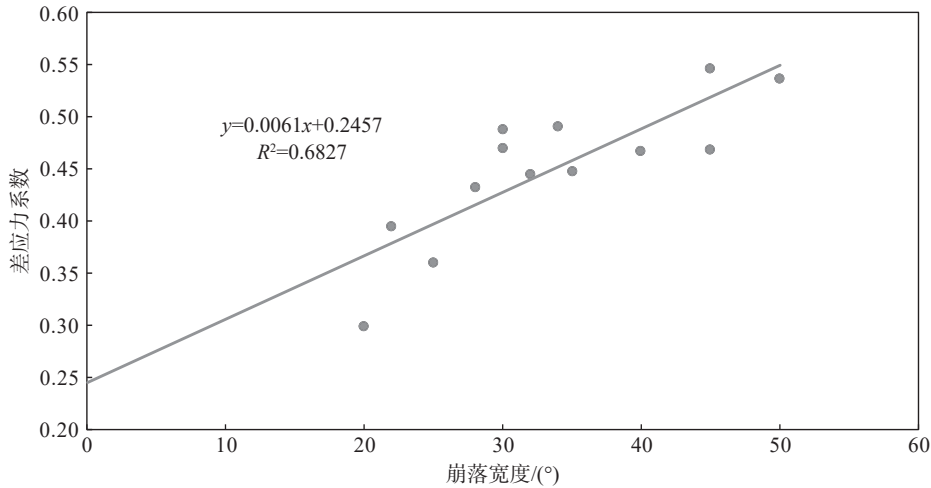


图 11 井壁崩落宽度与水平两向差应力关系图

Fig.11 Relationship between the width of the wellbore caving and the horizontal two-dimension differential stress

表 5 不同构造变形单元内不同层位构造应力系数反算结果

Table 5 Back-calculation results of tectonic stress coefficient of different layers in different tectonic deformation units

层位	构造应力系数	构造变形单元		
		新场	合兴场	丰谷
TX ₂ ¹ -TX ₂ ³	A	0.982	1.102	1.060
	B	0.510	0.650	0.610
TX ₂ ⁴ -TX ₂ ¹⁰	A	1.065	1.110	1.105
	B	0.624	0.660	0.648

形强度较大,多期断裂复合发育特征明显,故合兴场的构造应力系数明显大于新场和丰谷地区;随着埋深的增加上覆岩层压力增加,进而水平方向应力分量增加,使得构造应力系数存在分层性,即须二段 1-3 小层构造应力系数较 4-10 小层小。

测井计算结果显示,研究区测井计算的三向主应力值与水力压裂法、声发射法和差应变分析法等实测值计算的三向主应力值之间的吻合度均在 82% 以上;与此同时,基于测井计算的地应力大小可完成对单井岩石力学和地应力综合测井剖面的构建与分析(图 12),可以发现三向主应力值随着埋深的增加均呈现增大的趋势,且三向主应力值之间仍表现为Ⅲ类地应力类型,即走滑应力状态。测井解释的地应力大小与基于岩心实验测得的地应力大小结果的一致性,也反映了该研究区构建的地应力大小测井解释模型的适用性较好。

5.3 测井评价地应力方法的对比与适用性

成像测井资料评价地应力主要通过识别诱导缝形态和井壁崩落宽度等影像特征来反演现今地

应力大小;该方法具有不破坏岩心、计算简单快捷的优点,但其计算结果是一个波动范围,主要适用于无法钻取岩样时,可通过岩心观察和电成像相结合初步计算地应力大小。阵列声波测井计算地应力大小的方法可以获得连续性的地应力剖面,同时其计算精度较高,与实验结果的吻合度较好,有利于后续开发层段的选取等工程应用。

6 纵向上应力剖面结构特征及工程应用

6.1 应力剖面结构特征及类型

在不同地应力剖面类型和不同地层条件下,开发层段的选取标准有所区别,且应力结构对其具有重要指导意义。压裂段与上下围压之间地应力值的不同差别,对压裂缝高、裂缝穿层与否影响较大,而在川西地区常见的纵向地应力剖面类型主要有 5 种(周文, 2006): ①高低高(HLH)型; ②低低高(LLH)型; ③高低低(HLL)型; ④互层(HC)型; ⑤低应力(LC)型(图 13)。

对研究区各井地应力大小纵向变化剖面进行刻画,划分重点井段纵向地应力大小变化剖面结构类型,以须二 2 小层为例(图 14),受构造变形派生的局部应力影响,褶皱变形的高部位、不同断裂级次和不同断裂走向附近的应力结构剖面类型与平缓构造区的应力结构剖面类型有所差别,在 SN 向三级以上断层和 SN 向褶皱或 NEE 向褶皱变形的

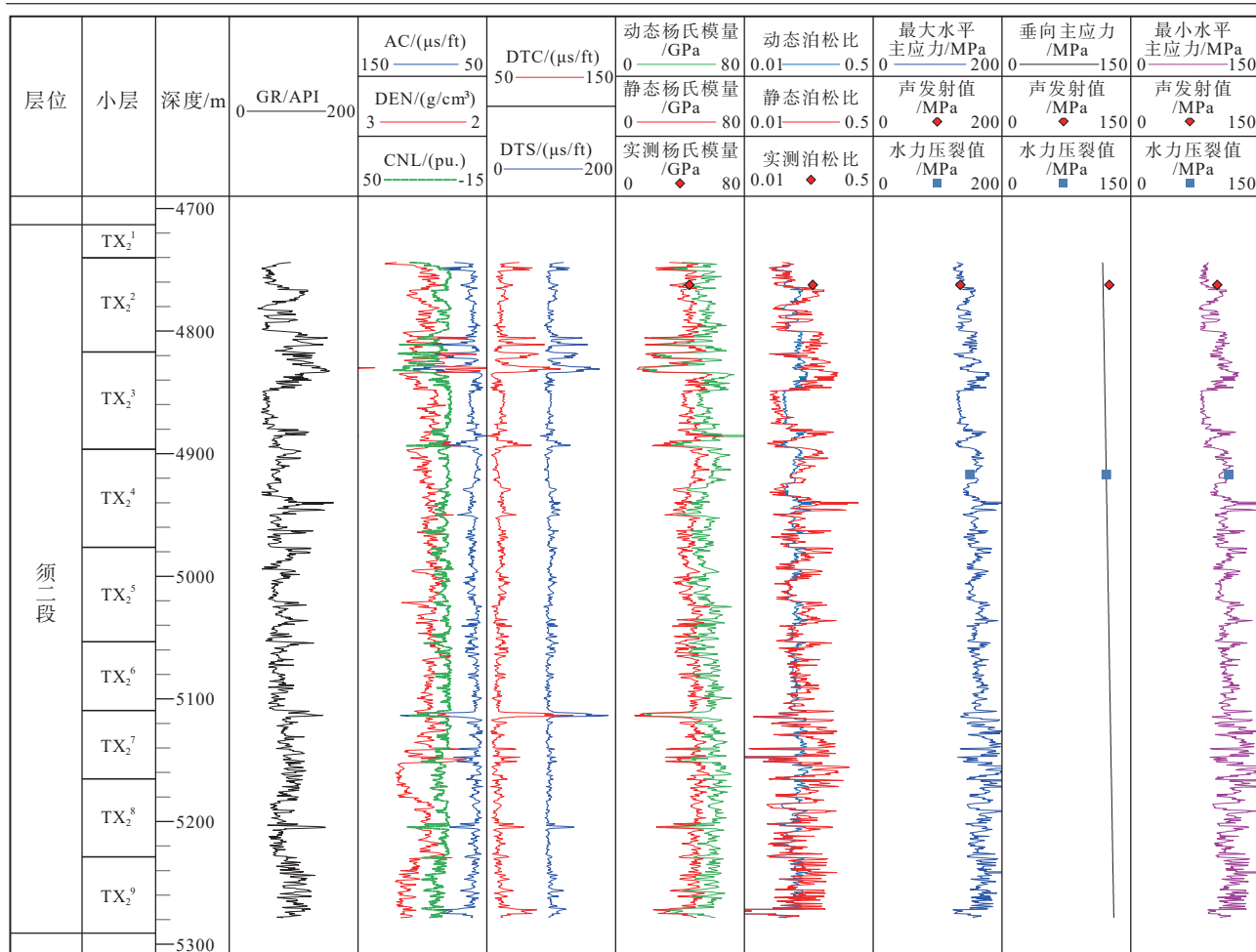


图 12 X11 井须二段各小层岩石力学与地应力综合剖面

Fig.12 Comprehensive section of rock mechanics and in-situ stress of each sublayer of the second member of Xujiahe Formation in Well X11

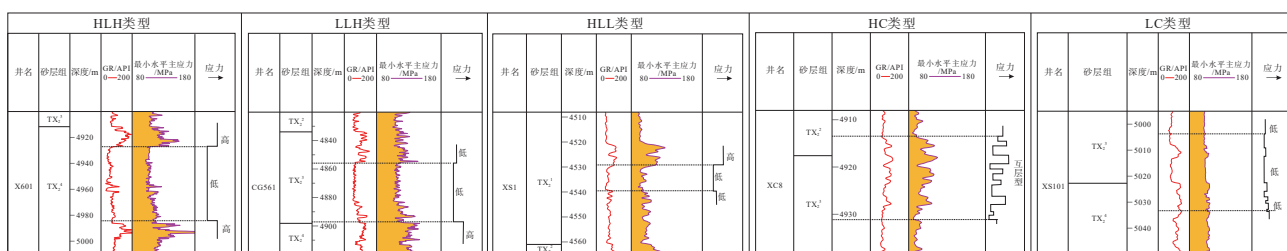


图 13 研究区须二段典型地应力剖面类型

Fig.13 Typical type of geostress profile in the second segment of Xujiang Formation in the study area

高部位以 LLH 和 LC 型为主,在小规模断层或平缓构造区以 HLH 或 HLL 型为主,HC 型较少。

6.2 应力剖面结构对水力压裂改造的影响与应用

为探讨不同地应力剖面类型在压裂施工改造中对裂缝的影响,本文利用 Fracman 软件模拟了这两种地应力剖面类型下不同储隔层应力差对裂缝

形态的影响,当隔层应力大小为 97 MPa,储层应力为 96 MPa、90 MPa 时,根据模拟结果可以看出:当储隔层应力差较小时(图 15a),压裂缝形态表现为横向缝长较小纵向缝宽较大,裂缝的纵向延拓出现穿层现象;当储隔层应力差较大时(图 15b),压裂缝形态呈现为横向缝长增加纵向缝宽减小。这反映

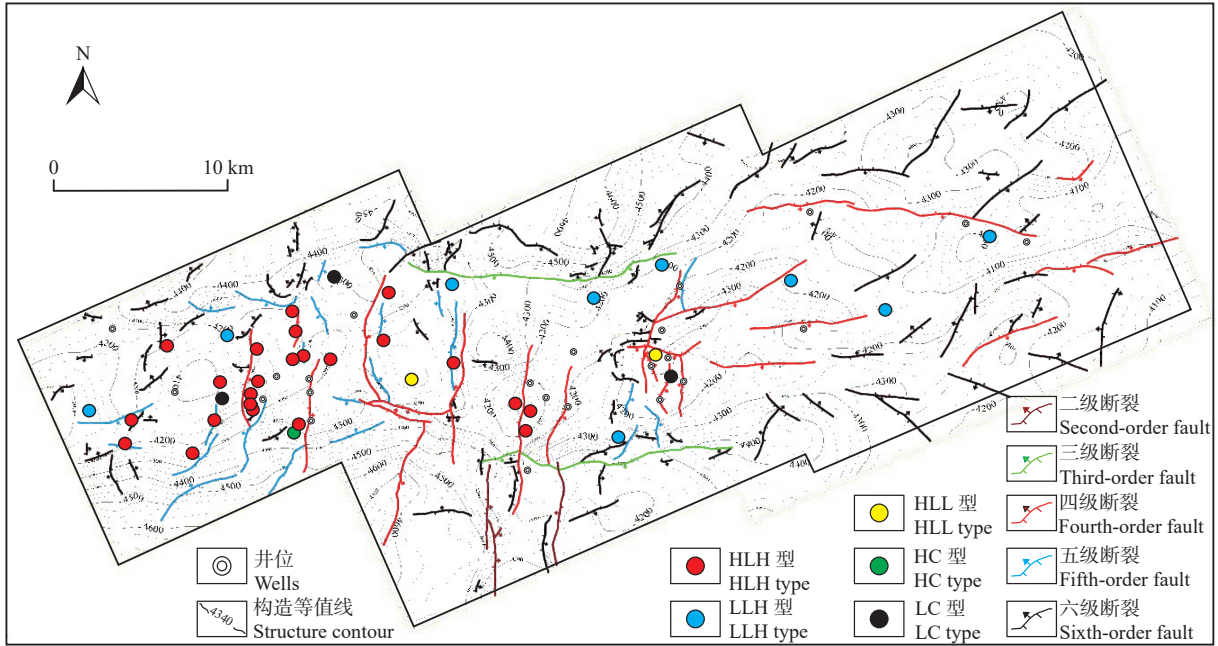


图 14 研究区 TX₂² 小层井上地应力剖面类型主要分布图
Fig.14 Main distribution of surface stress profile types of TX₂² sublayer in the study area

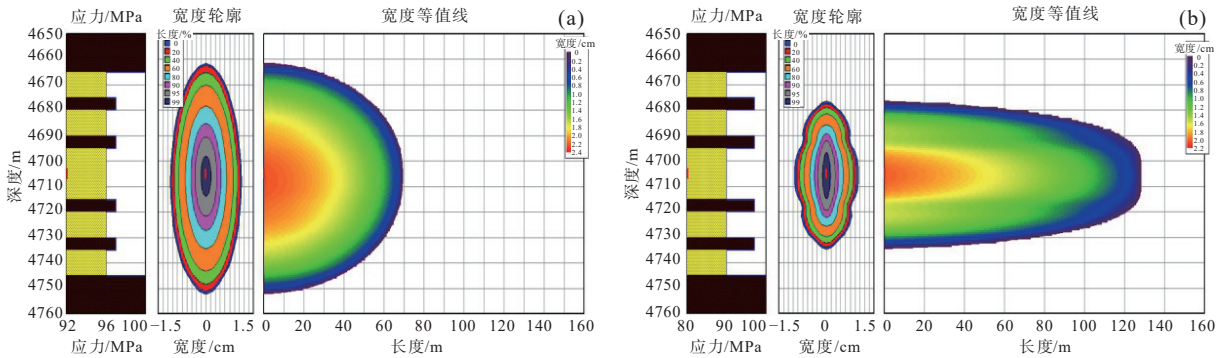


图 15 不同储隔层应力差模拟水力裂缝扩展形态图
a—隔层应力为 97 MPa, 储层应力为 96 MPa 对裂缝形态影响; b—隔层应力为 97 MPa, 储层应力为 90 MPa 对裂缝形态影响
Fig.15 Simulated hydraulic fracture propagation pattern of different reservoir and interlayer stress difference
a-The effect of interlayer stress of 97 MPa and reservoir stress of 96 MPa on fracture morphology; b-The effect of interlayer stress of 97 MPa and reservoir stress of 90 MPa on fracture morphology

了受储隔层应力差控制, 应力差增加抑制了裂缝的纵向延拓, 而水力压裂作用于裂缝拓展上的能量也随着纵向延拓的减小而不断转移并消耗于裂缝横向的延拓上, 因此横向上裂缝缝长逐渐增加。

根据以上的储层压裂段与上下围岩之间应力差对压裂缝高度的影响, 可以发现, 当储层与围岩隔层应力差越大时, 压裂缝延伸相对稳定, 一般位于压裂段内, 而当储隔层应力差较小时, 压裂缝会明显向外延伸, 可能出现穿层现象。因此, 在选择压裂层段时, 为了纵向上更多的穿透含气层, 同时

避开较大的缝高沟通底水, 以达到最大改造效果, 建议选择地应力剖面类型为 LLH 型为主的须二 2 中上部为优先开发层系。

7 结 论

(1) 本文采用声发射法和差应变分析法从实验角度评价了地应力大小, 并优选出了在均质性致密砂岩储层中精确度更高的差应变分析法; 形成了基于井壁影像特征计算地应力大小的方法, 该方法具有不破坏岩心, 计算简便快捷等优点; 基于声波测

井资料评价的地应力大小具有分辨率高、连续性好的优点,适用于进行工程开发的选层选段。

(2)实验结果表明,川西凹陷孝泉—丰谷地区须二段地应力表现为最大水平主应力>垂向主应力>最小水平主应力,为Ⅲ类地应力类型,处于走滑应力状态。

(3)研究区应选择 LLH 型地应力大小纵向变化剖面来进行开发选层选段,其向上可以穿透更多含气层,向下可以避免沟通底水。

注释

①刘向君. 2008. 川西地区工程地质特征研究 [R]. 四川: 中石化西南油气分公司工程技术研究院.

References

- Cai Meifeng. 1993. Review of principles and methods for rock stress measurement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 12(3): 275–283 (in Chinese with English abstract).
- Chen Nian, Wang Chenghu, Gao Guiyun, Wang Pu. 2021. Characteristics of in-situ stress field in the powerhouse area on the right bank of Baihetan based on stress polygon and borehole breakout method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 42(12): 3376–3384 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yuanfang, Shen Haichao, Zhao Yizhong. 2008. A simplified differential strain analysis stress method for in-situ stress measurement[J]. *Oil Drilling and Production Technology*, 30(2): 61–64 (in Chinese with English abstract).
- Dai Jinxing, Ni Yunyan, Wu Xiaoqi. 2012. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 39(3): 257–264 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xiaomin, Wang Xudong. 2007. The research on data processing about in-Situ stress measurement with AE[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, (11): 296–299 (in Chinese with English abstract).
- He Jianhua, Cao Feng, Deng Hucheng, Wang Yuanyuan, Li Yong, Xu Qinglong. 2023. Evaluation of in-situ stress in dense sandstone reservoirs in the second member of Xujiahe formation of the HC area of the Sichuan Basin and its application to dense sandstone gas development[J]. *Geology in China*: 50(4): 1107–1121 (in Chinese with English abstract).
- Huang Rongzun, Zhuang Jinjiang. 1986. A new method for predicting formation fracture pressure[J]. *Oil Drilling and Production Technology*, (3): 1–14 (in Chinese).
- Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. 2012. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 39(2):

- 129–136 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yongdong, Xian Xuefu, Xu Jiang. 2005. Research on application of Kaiser effect of acoustic emission to measuring initial stress in rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 26(6): 946–950 (in Chinese with English abstract).
- Li Guoxin, Lei Zhengdong, Dong Weihong, Wang Hongyan, Zheng Xingfan, Tan Jian. 2022. Progress, challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. *China Petroleum Exploration*, 27(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yaqun, Li Haibo, Jing Feng, Luo Chaowen, Chen Bingrui, Li Junru, Zhou Qingchun. 2007. Determination of in-situ stress by hydraulic fracturing tests on preexisting fractures considering stress gradient and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(6): 1145–1149 (in Chinese with English abstract).
- Mao H Y, Luo T T, Lai F Q, Zhang G T, Zhong L L. 2019. Experimental analysis and logging evaluation of in-situ stress of mud shale reservoir: Taking the deep shale gas reservoir of Longmaxi Formation in western Chongqing as an example[J]. *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*, 384(1): 012129.
- Qiu Zhen, Zou Caineng, Li Jianzhong, Guo Qiulin, Wu Xiaozhi, Hou Lianhua. 2013. Unconventional petroleum resources assessment: Progress and future prospects[J]. *Natural Gas Geoscience*, 24(2): 238–246 (in Chinese with English abstract).
- Schmitt D R, Currie C A, Zhang L. 2012. Crustal stress determination from boreholes and rock cores: Fundamental principles[J]. *Tectonophysics*, 580: 1–26.
- Shen Haichao, Cheng Yuanyuan, Wang Jingyin, Zhao Yizhong, Zhang Jianguo. 2008. Principal direction differential strain method for in-situ stress measurement and application[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, (2): 250–252 (in Chinese with English abstract).
- Shi Lin, Zhang Xudong, Jin Yan, Chen Mian. 2004. New method for measurement of in-situ stresses at great depth[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, (14): 2355–2358 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chenghu, Gao Guiyun, Wang Hong, Wang Pu. 2020. Integrated determination of principal stress and tensile strength of rock based on the laboratory and field hydraulic fracturing tests[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(2): 167–174 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pu, Wang Chenghu, Yang Ruhua, Hou Zhengyang, Wang Hong. 2019. Preliminary investigation on the deep rock stresses prediction method based on stress polygon and focal mechanism solution[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 40(11): 4486–4496 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoqiong, Ge Hongkui, Song Lili, Hetai Ming, Xinwei. 2011. Experimental study of two types of rock sample acoustic emission events and Kaiser effect point recognition approach[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(3): 580–588 (in

- Chinese with English abstract).
- Yin Shuai, Ding Wenlong, Lin Lifei, Liu Hanlin, Li Airong. 2023. Characteristics and the controlling effect on hydrocarbon accumulation of fractures in Yanchang Formation in Zhidan–Wuqi area, western Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 48(7): 2614–2629 (in Chinese with English abstract).
- Yin Shuai, Sun Xiaoguang, Wu Zhonghu, Wang Yingbin, Zhao Jingzhou, Sun Weihao, Yan Haolin. 2022. Coupling control of tectonic evolution and fractures on the Upper Paleozoic gas reservoirs in the northeastern margin of the Ordos Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 53(9): 3724–3737 (in Chinese with English abstract).
- Yin Xingyao, Ma Ni, Ma Zhengqian, Zong Zhaoyun. 2018. Review of in-situ stress prediction technology[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 57(4): 488–504 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chongyuan, Wu Manlu, Chen Qunze, Liao Chunting, Feng Chengjun. 2012. Reviews of in-situ stress measurement methods[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 31(3): 305–310 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jincai, Fan Xin, Huang Zhiwen, Liu Zhongqun, Qi Yuanchang. 2021. Assessment of anisotropic in-situ stresses in the upper Triassic Xujiahe Formation reservoirs in Western Sichuan Depression of the Sichuan Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 42(4): 963–972 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kang, Zhang Liqin, Liu Dongmei. 2022. Situation of China's oil and gas exploration and development in recent years and relevant suggestions[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 43(1): 15–28, 111 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Gang, Dong Shier. 2009. The theory of the measurement of ground stress by hydraulic fracturing method and its application[J]. *Shanxi Architecture*, 35(36): 77–78 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Herong, Liu Zhongqun, Xu Shilin, Liu Zhenfeng, Liu Junlong, Huang Zhiwen, Huang Yanqing, Shi Zhiliang, Wu Qingzhao, Fan Lingxiao, Gao Jinhui. 2021. Progress and key research directions of tight gas exploration and development in Xujiahe Formation, Sinopec exploration areas, Sichuan Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 42(4): 765–783 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Wen. 2006. The Characteristics of In-situ Earth Stress and its Application Research in Engineering Geology of Petroleum on Compact Reservoir in Western Sichuan Depression[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–142 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Haiyan, Song Yu jia, Xu Yun, Li Kuidong, Tang Xuanhe. 2021. Four-dimensional in-situ stress evolution of shale gas reservoirs and its impact on infill well complex fractures propagation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 42(9): 1224–1236 (in Chinese with English abstract).
- Ziegler M, Valley B. 2021. Evaluation of the diametrical core deformation and discing analyses for in-situ stress estimation and application to the 4.9 km deep rock core from the Basel geothermal borehole, Switzerland[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(12): 6511–6532.
- Zoback M D, Barton C A, Brudy M, Castillo D A, Finkbeiner T, Grollmund B R, Moos D B, Peska P, Ward C D, Wiprut D J. 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7): 1049–1076.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Yang Zhi, Yuan Xuanjun, Zhu Rukai, Hou Lianhua, Jia Jinhua, Wang Lan, Wu Songtao, Bai Bin, Gao Xiaohui, Yang Chun. 2012. New advance in unconventional petroleum exploration and research in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(4): 312–322 (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Yang Zhi, He Dongbo, Wei Yunsheng, Li Jian, Jia Ailin, Chen Jianjun, Zhao Qun, Li Yilong, Li Jun, Yang Shen. 2018. Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4): 575–587 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡美峰. 1993. 地应力测量原理和方法的评述[J]. *岩石力学与工程学报*, 12(3): 275–283.
- 陈念, 王成虎, 高桂云, 王璞. 2021. 基于应力多边形与钻孔崩落的白鹤滩右岸厂房区地应力场特征研究[J]. *岩土力学*, 42(12): 3376–3384.
- 程远方, 沈海超, 赵益忠. 2008. 一种简化的差应变地应力测量技术[J]. *石油钻采工艺*, 30(2): 61–64.
- 戴金星, 倪云燕, 吴小奇. 2012. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. *石油勘探与开发*, 39(3): 257–264.
- 付小敏, 王旭东. 2007. 利用岩石声发射测试地应力数据处理方法的研究[J]. *实验室研究与探索*, (11): 296–299.
- 何建华, 曹峰, 邓虎成, 王园园, 李勇, 徐庆龙. 2023. 四川盆地 HC 地区须二段致密砂岩储层地应力评价及其在致密气开发中的应用[J]. *中国地质*, 50(4): 1107–1121.
- 黄荣樽, 庄锦江. 1986. 一种新的地层破裂压力预测方法[J]. *石油钻采工艺*, (3): 1–14.
- 贾承造, 郑民, 张永峰. 2012. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. *石油勘探与开发*, 39(2): 129–136.
- 姜永东, 鲜学福, 许江. 2005. 岩石声发射 Kaiser 效应应用于地应力测试的研究[J]. *岩土力学*, 26(6): 946–950.
- 李国欣, 雷征东, 董伟宏, 王红岩, 郑兴范, 谭健. 2022. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望[J]. *中国石油勘探*, 27(1): 1–11.
- 刘亚群, 李海波, 景锋, 罗超文, 陈炳瑞, 李俊如, 周青春. 2007. 考虑应力梯度的原生裂隙水压致裂法地应力测量的原理及工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 26(6): 1145–1149.
- 邱振, 邹才能, 李建忠, 郭秋麟, 吴晓智, 侯连华. 2013. 非常规油气资源评价进展与未来展望[J]. *天然气地球科学*, 24(2): 238–246.
- 沈海超, 程远方, 王京印, 赵益忠, 张建国. 2008. 主方向差应变地应力测量方法[J]. *新疆石油地质*, (2): 250–252.

- 石林, 张旭东, 金衍, 陈勉. 2004. 深层地应力测量新方法[J]. 岩石力学与工程学报, (14): 2355-2358.
- 王成虎, 高桂云, 王洪, 王璞. 2020. 利用室内和现场水压致裂试验联合确定地应力与岩石抗拉强度[J]. 地质力学学报, 26(2): 167-174.
- 王璞, 王成虎, 杨汝华, 侯正阳, 王洪. 2019. 基于应力多边形与震源机制解的深部岩体应力状态预测方法初探[J]. 岩土力学, 40(11): 4486-4496.
- 王小琼, 葛洪魁, 宋丽莉, 和泰名, 辛维. 2011. 两类岩石声发射事件与 Kaiser 效应点识别方法的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 30(3): 580-588.
- 尹帅, 丁文龙, 林利飞, 刘翰林, 李爱荣. 2023. 鄂尔多斯盆地西部志丹-吴起地区延长组裂缝特征及其控藏作用[J]. 地球科学, 48(7): 2614-2629.
- 尹帅, 孙晓光, 邬忠虎, 王应斌, 赵靖舟, 孙伟豪, 闫浩霖. 2022. 鄂尔多斯盆地东北缘上古生界构造演化及裂缝耦合控气作用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 53(9): 3724-3737.
- 印兴耀, 马妮, 马正乾, 宗兆云. 2018. 地应力预测技术的研究现状与进展[J]. 石油物探, 57(4): 488-504.
- 张重远, 吴满路, 陈群策, 廖椿庭, 丰成君. 2012. 地应力测量方法综述[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 31(3): 305-310.
- 张金才, 范鑫, 黄志文, 刘忠群, 亓原昌. 2021. 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组储层各向异性地应力评价方法[J]. 石油与天然气地质, 42(4): 963-972.
- 张抗, 张立勤, 刘冬梅. 2022. 近年中国油气勘探开发形势及发展建议[J]. 石油学报, 43(1): 15-28, 111.
- 赵刚, 董事尔. 2009. 水压致裂法测量地应力理论与应用[J]. 山西建筑, 35(36): 77-78.
- 郑和荣, 刘忠群, 徐士林, 刘振峰, 刘君龙, 黄志文, 黄彦庆, 石志良, 武清钊, 范凌霄, 高金慧. 2021. 四川盆地中国石化探区须家河组致密砂岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 42(4): 765-783.
- 周文. 2006. 川西致密储层现今地应力场特征及石油工程地质应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1-142.
- 朱海燕, 宋宇家, 胥云, 李奎东, 唐焯赫. 2021. 页岩气储层四维地应力演化及加密井复杂裂缝扩展规律[J]. 石油学报, 42(9): 1224-1236.
- 邹才能, 陶士振, 杨智, 袁选俊, 朱如凯, 侯连华, 贾进华, 王岚, 吴松涛, 白斌, 高晓辉, 杨春. 2012. 中国非常规油气勘探与研究新进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(4): 312-322.
- 邹才能, 杨智, 何东博, 位云生, 李剑, 贾爱林, 陈建军, 赵群, 李易隆, 李君, 杨慎. 2018. 常规-非常规天然气理论、技术及前景[J]. 石油勘探与开发, 45(04): 575-587.