

塔里木盆地塔中地区上奥陶统古构造应力场模拟与裂缝分布预测

丁文龙^{1,2}, 樊太亮^{1,2}, 黄晓波³, 李春燕^{1,2}

DING Wen-long^{1,2}, FAN Tai-liang^{1,2}, HUANG Xiao-bo³, LI Chun-yan^{1,2}

1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学/教育部海相储层演化与油气富集机理重点实验室, 北京 100083;

3. 中国海洋石油有限公司天津分公司勘探开发研究院, 天津 300452

1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *Key Laboratory for Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Abundance Mechanism, Ministry of Education/China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

3. *Exploration and Development Research Institute, Tianjin Branch Company, CNOOC, Tianjin 300452, China*

摘要:塔里木盆地塔中地区上奥陶统良里塔格组碳酸盐岩构造裂缝是区内油气显示十分活跃的有效储集空间,其发育和分布主要受古构造应力场的控制。依据塔中地区上奥陶统地震资料的断裂构造解释和钻井、测井裂缝特征分析等成果,在声发射地应力测量、岩石力学参数和单轴抗拉强度测试的基础上,考虑断裂对裂缝形成的影响,采用三维有限元法对塔中地区上奥陶统加里东中期Ⅱ幕裂缝形成期的古构造应力场进行了数值模拟,预测了裂缝的分布。结果表明,裂缝形成期地应力最大主应力有效值为47.9~58.3MPa,平均值为51.97MPa,抗张强度为5.13~6.91MPa,平均值为5.81MPa。有效张应力的高值区是构造裂缝发育的有利地区,主要分布在塔中东部大的断裂带交会处和断裂带的部分区段内,与实际钻井统计的上奥陶统高裂缝线密度和油气井分布区基本吻合,可以为研究区的油气勘探提供新的地质依据。

关键词:塔里木盆地;塔中地区;上奥陶统;构造应力场;裂缝预测

中图分类号:P534.42; P542⁺.3

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2011)04-0588-07

Ding W L, Fan T L, Huang X B, Li C Y. Upper Ordovician paleo tectonic stress field simulating and fracture distribution forecasting in Tazhong area of Tarim Basin, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 2010, 30(4): 588-594

Abstract: The structural fractures in the Upper Ordovician Lianglitage Formation in Tazhong area, which has active hydrocarbon show, is effective reservoir space for hydrocarbon accumulation. Fracture reservoir is controlled by paleo structural stress field. Based on the faults systems interpreted from seismic data, fractures characteristics from drilling and logging data, carbonate reservoirs are studied from acoustic emission, stress measurement, rock mechanics parameters and uniaxial tensile test. Considering the influence of faults on the fracture forming, 3-D finite element method is applied to simulate the period II Middle Caledonian paleo structural stress field in the Tazhong area and predict the distribution of fractures. The simulation result shows that during fracturing the maximum major stress effective value range from 47.9 to 58.3MPa, with average 51.97 MPa, tensile strength ranging from 5.13~6.91MPa, with average 5.81MPa. High value area of effective tensile stress is the favorable area for structural fractured reservoirs development, most distributed in the interchange area of fracturing belts and part section of fractured zone in the east of Tazhong area, coinciding with the Ordovician fracture-developed zone defined by fracture linear density statistic date from actual drilling, which provides new geological evidences for the Lower-Middle Ordovician carbonate rock prospecting and exploitation.

Key words: Tarim Basin; Tazhong area; Upper Ordovician; tectonic stress field; fracture forecasting

收稿日期: 2010-11-05; 修订日期: 2011-02-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41072098); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(编号: 2006CB202302); 国家科技重大专项(编号: 2008ZX05031-001-005HZ)联合资助

作者简介: 丁文龙(1965-), 男, 博士后, 副教授, 从事石油构造分析与控油气作用方面的教学与科研工作。E-mail: dingwenlong2006@126.com

塔中地区位于塔里木盆地中央隆起区的中部,面积约 $6.5\times 10^4\text{km}^2$ 。是塔里木盆地油气勘探程度较高、潜力较大的地区之一。2005 年塔中 I 号断裂带上奥陶统良里塔格组(O_3l)礁滩体钻探获得突破,表明礁滩相内幕型和岩溶-裂缝型储层是该地区海相碳酸盐岩新的重要储集类型之一^[1-2],其形成和发育均受到了强烈构造作用的改造,构造裂缝是区内油气显示十分活跃的有效储集空间,裂缝发育程度与构造应力场和断裂构造关系非常密切^[3-5]。近年来,已有许多学者研究了塔里木盆地构造应力场与油气储层裂缝发育及分布的关系,取得了很多重要认识,并有效地指导了油气勘探^[6-9],故构造应力场模拟可以预测构造裂缝的发育及分布。笔者通过对塔中地区上奥陶统声发射地应力测量、岩石力学参数和单轴抗拉强度进行测试,并考虑断裂对裂缝形成的影

响,采用三维有限元法模拟塔中地区上奥陶统加里东中期 II 幕裂缝主要形成期的古构造应力场,预测了构造裂缝发育的有利区,为该地区上奥陶统油气勘探提供了新的地质依据。

1 断裂体系与裂缝发育特征

1.1 断裂体系

塔中地区二维和三维地震构造解释结果表明,上奥陶统顶面(T_7^0)和底界面(T_7^4)地震反射面之间的碳酸盐岩地层中断裂比较发育,断裂体系以北西西向压扭性基底卷入式为主,叠加了北东向和北东东向的压扭性断裂,大的断裂主要呈北西西向展布,如,塔中 I 号断裂带、塔中 II 号断裂带和塔中 5 井断裂带,其余的为规模相对较小的次级断裂(图 1),断裂体系主要是在中一晚奥陶世末加里东运动中期,

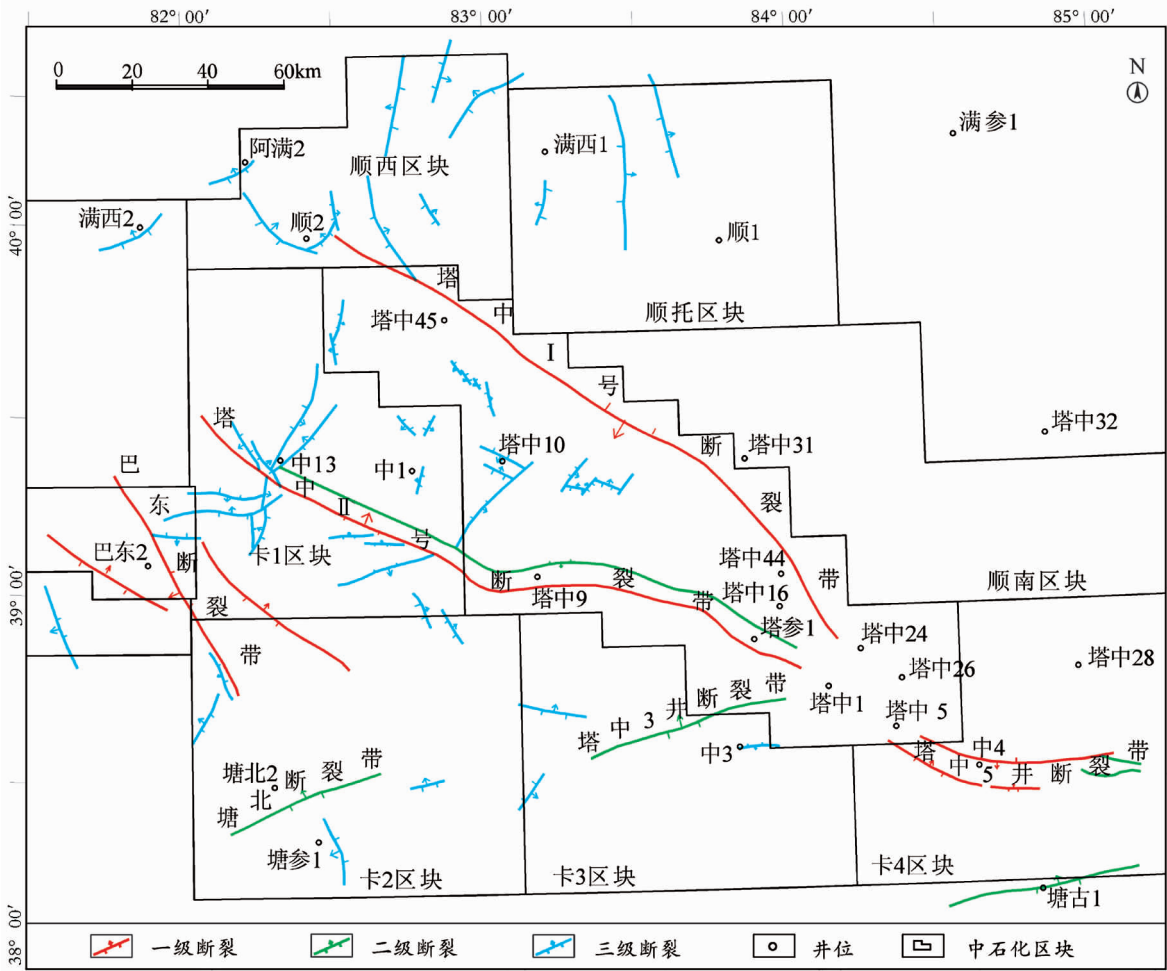


图 1 塔中地区上奥陶统顶界(T_7^0) 断裂体系图

Fig. 1 Fault system of Upper Ordovician top surface (T_7^0) in Tazhong area

在近南北向的挤压和右旋压扭构造应力作用下形成的,其直接控制着上奥陶统碳酸盐岩裂缝型储层的发育和分布。

1.2 裂缝发育特征

塔中地区 50 多口钻井上奥陶统良里塔格组(O_3l)裂缝发育特征的统计表明,上奥陶统良里塔格组(O_3l)碳酸盐岩储层构造裂缝比较发育,岩性以石灰岩为主(图 2),裂缝倾向以北西、南东向占主导,走向北北东-南南西,走向与背斜轴向垂直,以横张裂缝为主,与背斜轴向平行的纵张裂缝不发育,近南北或北北东向的横张裂缝组系与主要的逆冲断裂的走向近于垂直。塔里木盆地区域构造演化研究成果表明^[5,7,10],从加里东期以来,长期近南北向的区域挤压应力场有利于这一方向裂缝组系的发育;现今盆地区域应力也是近南北向的挤压,最小应力方向呈东西向,有利于北北东向横张裂缝的发育。裂缝倾角主峰值为 70~90°,以高角度裂缝和垂直裂缝为主,低角度裂缝较少,显示出裂缝的发育、分布与断裂和构造应力场关系非常密切。

2 构造应力场数值模拟

应用三维有限单元法进行数值模拟计算应力场^[11-14],是将一个地质体离散成有限个连续的单元,单元之间以节点相连,每个单元赋予其实际的岩石力学参数。把求解研究区域内的连续场函数转化为

求解有限个离散点(节点)处的场函数值,基本变量是位移、应变和应力。根据边界受力条件和节点的平衡条件,建立并求解以节点位移或单元内应力为未知量、以总体刚度矩阵为系数的联合方程组,用构造插值函数求得每个节点上的位移,进而计算每个单元内的应力和应变值。随着剖分单元数量的增多,越接近于实际的地质体,求解越真实,精度越高。

2.1 三维单元格体划分及岩石力学参数

对塔中地区主要勘探目的层上奥陶统顶面(T_7^0)、底界面(T_7^4)加里东中期Ⅱ幕的古构造图,采用相邻剖面的相对 8 个节点组成 1 个单元格体的方法,对研究区域进行网格化,在网格划分时,还考虑了塔中Ⅰ号、塔中Ⅱ号和塔中 5 井等几条大断层带对地层的影响(图 3),断层带单元的宽度是根据断层的规模和水平断距大小来划分的,全部有限元网格剖分后,得到了 7286 个节点,共生成 5385 个单元格体(图 3)。

依据中 4 井上奥陶统碳酸盐岩岩心岩石力学性质测试结果,确定出了塔中地区地震反射界面 T_7^0 与 T_7^4 之间的上奥陶统地层模拟参数(表 1),即弹性模量平均值是 47.60GPa,泊松比为 0.165,密度是 2.65g/cm³,单轴抗压强度为 79.11MPa;断层模拟参数弹性模量是地层的 1/2,泊松比和密度与地层相当。

2.3 边界力作用方式和约束条件

塔里木盆地中央隆起带(包括塔中隆起)及其以

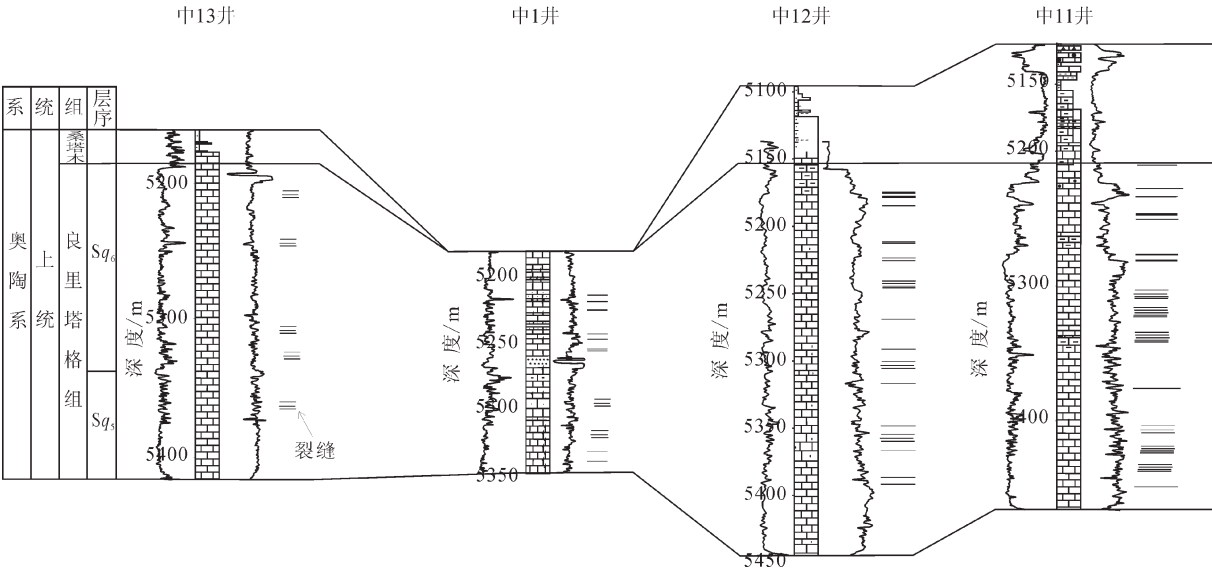


图 2 塔中地区上奥陶统裂缝纵向发育特征

Fig. 2 The vertical developed characteristics of Upper Ordovician fractures in Tazhong area

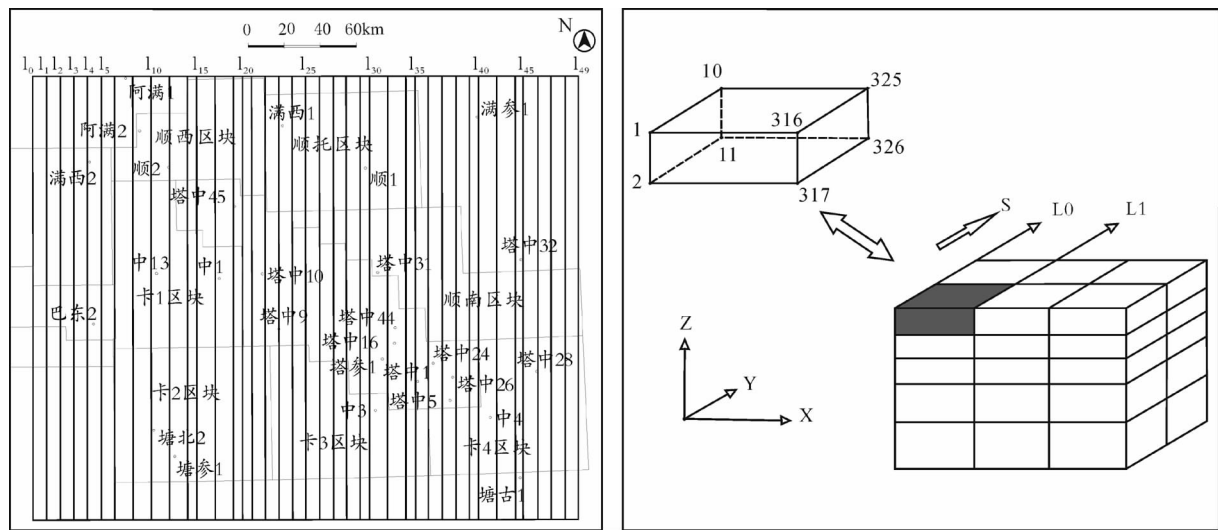


图 3 塔中地区三维有限元网格化与单元体组成示意图

Fig. 3 Sketch map of 3D finite element grid and unit composition in Tazhong area

左图中 I₀…… I₄₉ 为网格线编号,数字为节点编号

表 1 塔中地区上奥陶统碳酸盐岩岩石力学性质参数实验结果

Table 1 Test results of rock mechanics parameters of Upper Ordovician carbonate rocks in Tazhong area

试验 编号	井号及 层位	直径 /mm	高度 /mm	天然密度 /g·cm ⁻³	单轴抗压 强度 (σ_c)/MPa	弹性 模量 (E)/GPa	泊松比 μ
1	中 4 O ₃ l	24.8	50.2	2.632	118.66	55.54	0.146
2	中 4 O ₃ l	24.6	50.3	2.665	66.61	41.28	0.155
3	中 4 O ₃ l	24.6	47.6	2.652	52.07	45.97	0.194

西地区,受盆地南部边界西昆仑洋在奥陶纪末加里东中期Ⅱ幕闭合褶皱造山向北大规模地逆冲推挤,在近南北向区域性挤压构造应力作用下冲断隆升^[10]。因此,上奥陶统沉积末期,地质模型边界的受力方式设置为:顶面是自由面,底部界面法向进行刚性约束,四周界面为受力面,假定其只受水平方向边界力的作用,且以正应力的方式施加于边界上,模拟时还考虑单元的重力作用。最大主压应力方向为近 SN 向,最小主压应力方向为近 EW 向,即近 SN 向均匀挤压和近 EW 向均匀挤压同时进行。上述边界力的作用方式,综合反映了奥陶纪末加里东中期Ⅱ幕区域上近 SN 向挤压应力场的特征。上奥陶统目的层奥陶纪末期应力场模拟边界力中最大主压应力主要是根据上奥陶统岩心样

品声发射实验^[15-17]测得的地应力数据,结合塔里木盆地区域构造演化期次分析成果^[5,7,10]确定的,塔中地区加里东中期Ⅱ幕地应力最大主压应力有效值(σ_1 有效)为 47.9~58.3MPa,平均值为 51.97MPa(表2)。根据最大主应力与最小主应力相互关系的经验公式,取最小主压应力值为 24MPa。

表 2 塔中地区上奥陶统加里东中期Ⅱ幕声发射地应力最大主应力有效值(σ_1 有效)测试结果

Table 2 Acoustic emission test results of Middle Caledonian Ⅱ effective maximum principal stress of Upper Ordovician carbonate rocks in Tazhong area

测点井号	层位	岩性	平均深度/m	最大主应力有效值 (σ_1 有效)/MPa
中 4 井	良里塔格组(O ₃ l)	灰岩	5061	58.3
中 4 井	良里塔格组(O ₃ l)	灰岩	4906	47.9
中 4 井	良里塔格组(O ₃ l)	灰岩	4908	49.7

除了确定模型的受力边界条件以外, 还需进行位移约束边界条件分析, 即将地质模型的边界远离研究中心区域, 在合适的边界上给出刚性位移约束, 以便限制地质模型的平移和旋转。在研究中心区域与强制边界条件之间要有3排单元和4排节点的距离, 即可使其对计算结果影响降至比较低的程度。

2.4 构造应力场分布特征

约定最大主压应力为 σ_3 和最小主压应力为 σ_1 , 且 σ_3 、 σ_1 方向水平(张为正); 中间主应力为 σ_2 , 且 σ_2 方向垂直。即文中最小主压应力 σ_1 、最大主压应力 σ_3 分别相当于地质力学中的最大主张应力 σ_3 、最大主压应力 σ_1 。通过以上步骤, 采用中国地震局地质研究所的构造应力场模拟软件, 模拟出了塔中地区上奥陶统($T_7^4-T_7^0$)加里东中期Ⅱ幕裂缝形成期的有效张应力 σ_T 分布情况。有效张应力 σ_T 高值($\sigma_T>8\text{MPa}$)区主要分布于塔中Ⅰ号断裂带东段、塔中Ⅱ号断裂带中段和东段、塔中5井断裂带西段、巴东断裂带上盘、塔中3井断裂带两侧、顺南区块的东南部和塔中27井至塔中28井一线北侧, 以及塔中东部多组断裂带交会的区域。有效张应力 σ_T 中值($5\text{MPa}<\sigma_T<8\text{MPa}$)区主要分布于塔中Ⅰ、Ⅱ号断裂带之间的中北部区域, 塔中Ⅱ号断裂带下盘, 顺南区块的东北部地区和巴东断裂带南北两侧(图4)。

3 裂缝分布预测

3.1 格里菲斯平面破裂判别准则

根据格里菲斯强度理论的平面破裂准则, 在脆性材料抗张强度确定的条件下, 有效张应力 σ_T 值可以作为描述岩层张裂缝和张剪裂缝发育程度的一个特征参数, 其含义是指岩层内存在的张应力状态。 σ_T 值越大, 表示产生张性破坏的可能性越大, 特别是岩性均匀的碳酸盐岩地区, 岩石抗张强度相差不大, σ_T 值与张裂缝或张剪裂缝发育强度呈正相关关系, 即 σ_T 值愈大, 表明破裂程度愈强, 裂缝愈发育。有效张

应力 σ_T 等于或大于某一正数 δ , 即: $\sigma_T\geq\delta$, 产生潜在张裂缝(含张剪裂缝), δ 指某一正数($\delta\geq 0$), 为岩石抗张强度。由中13井上奥陶统碳酸盐岩岩石劈裂实验, 测得塔中地区上奥陶统碳酸盐岩地层岩石抗张强度为5.81MPa, 近似6MPa(表3)。故选取有效张应力 $\sigma_T\geq 6\text{MPa}$ 为发育潜在张裂缝(含张剪裂缝)的判别标准。按照 σ_T 的相对大小, 将上奥陶统潜在张裂缝和张剪裂缝发育程度划分为3级, 即一级、二级和三级, 分别表示裂缝发育区、比较发育区和发育较差区。

3.2 裂缝发育区预测和验证

依据实测的上奥陶统碳酸盐岩地层岩石抗张强度确定的潜在张裂缝(含张剪裂缝)的判别标准和有效张应力分布, 预测出一级裂缝发育区主要分布在塔中Ⅰ号断裂带东段、塔中Ⅱ号断裂带中段和东端、塔中5井断裂带西段、巴东断裂带上盘、塔中3井断裂带两侧、顺南区块的东南部和塔中27井至塔中28井一线北侧, 以及隆起东部多组断裂带交会的区域(图5), 有效张应力 $\sigma_T\geq 8\text{MPa}$ 。二级裂缝发育区主要分布在塔中Ⅰ和Ⅱ号断裂之间的东部区域、顺南区块东南部的大部分区域、塔中Ⅱ号断裂带东段下盘、巴东断裂带上盘等, 有效张应力 σ_T 为5~8MPa。三级裂缝发育区主要分布于塔中Ⅰ、Ⅱ号断裂带之间的西部区域, 巴东2井区南部和塔中北坡顺南区块的中东部, 塔中南坡亦有零星分布, 有效张应力 σ_T 仍然为5~8MPa。

为了验证塔中地区上奥陶统构造应力场模拟裂缝预测的效果, 将其与通过FMI成像测井资料识别的裂缝及岩心裂缝的观察统计得到的上奥陶统现今裂缝线密度分布图进行叠合(图5), 发现构造应力场模拟预测的一级裂缝发育区为裂缝线密度高值区, 线密度大于1.5条/m; 二级和三级裂缝发育区裂缝线密度相对较低, 在0.5~1.0条/m之间。由此可见, 预测的一级裂缝发育区与钻井揭示结果吻合好, 如塔中Ⅰ号、Ⅱ号断裂带的交会处和Ⅱ号断裂带中

表3 塔中地区上奥陶统岩石单轴抗张强度测试数据
Table 3 Test results of uniaxial tensile strength
of Upper Ordovician carbonate rock in Tazhong area

试样编号	井号及层位	直径/mm	高度/mm	破坏载荷/kN	抗张强度/MPa
1	中13 O ₃ l	24.3	15.3	4.037	6.91
2	中13 O ₃ l	24.3	14.6	2.859	5.13
3	中13 O ₃ l	24.3	15.1	3.102	5.38

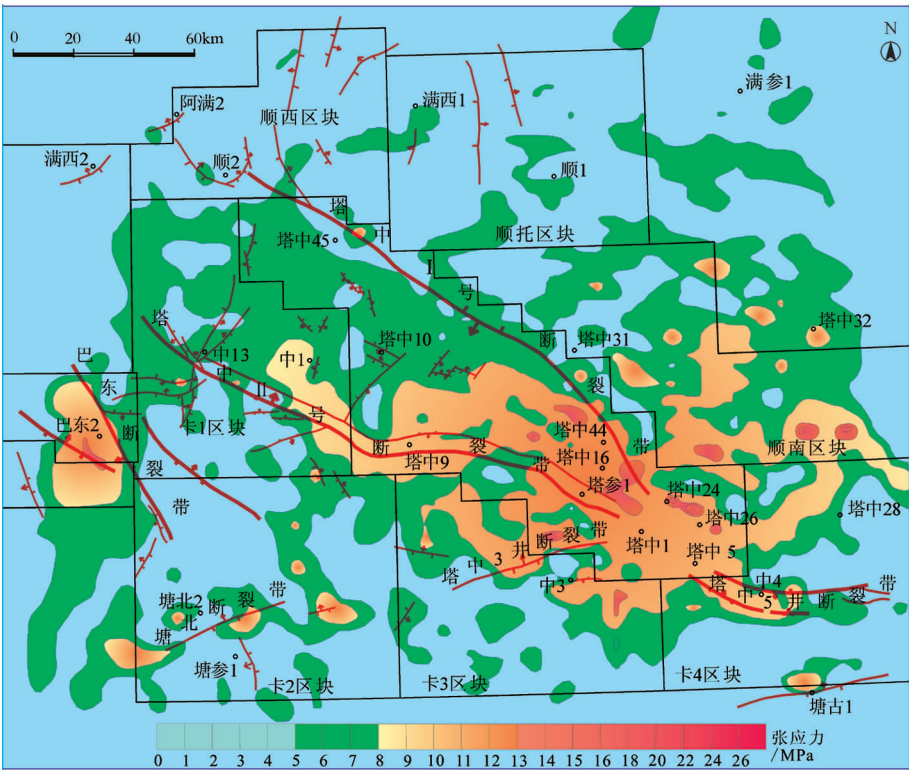


图 4 塔中地区上奥陶统加里东中期Ⅱ幕有效张应力 σ_T 分布图

Fig. 4 Distribution of Middle Caledonian II effective tensile stress field of Upper Ordovician

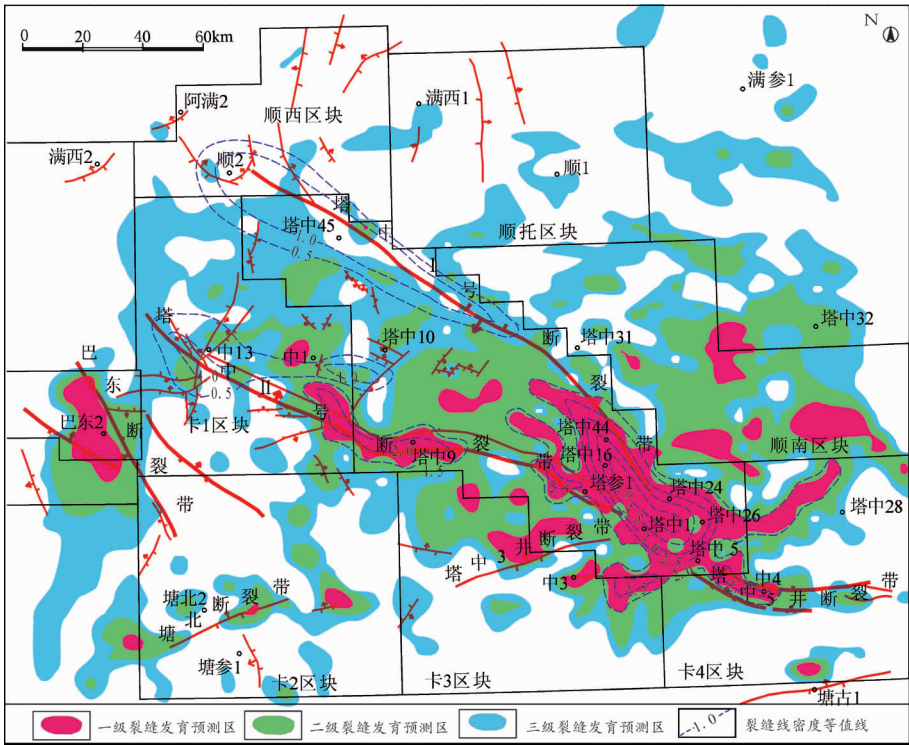


图 5 塔中地区上奥陶统裂缝发育分布预测和验证

Fig. 5 Present fracture distribution and verification of Upper Ordovician carbonate rock

段,目前已获得的工业油气流井均处在裂缝发育的有利区内。二级和三级裂缝发育区虽然有效张应力 σ_T 较高,但是裂缝线密度相对较低,而该区内仍有工业油气流或有良好油气显示的井,如塔中Ⅰ号断裂带的中、东段,预测的裂缝比较发育区、发育较差区与实际油气钻探成果不完全吻合。

4 结 论

(1)塔中地区上奥陶统良里塔格组碳酸盐岩中北北东向横张裂缝发育,以高角度裂缝和垂直裂缝为主。控制裂缝发育程度的因素除了岩石力学性质以外,主要是加里东中期Ⅱ幕裂缝形成期的古构造应力场,其最大主应力有效值为47.9~58.3MPa,平均值51.97MPa,抗张强度5.13~6.91MPa,平均值5.81MPa。

(2)塔中地区上奥陶统良里塔格组海相碳酸盐岩有效张应力高值区是构造裂缝发育的有利区,主要分布在塔中东部几组大的断裂带交会处和塔中Ⅱ号断裂带中段,裂缝线密度高;有效张应力中值区为裂缝发育的较有利区,主要分布在塔中Ⅰ、Ⅱ号断裂带之间的东部区域。二者均是现今塔中地区上奥陶统裂缝型油气储层的分布区域。

(3)利用三维有限元法进行构造应力场模拟,预测裂缝分布的效果,关键在于地质模型、力学模型和计算模型的合理性和准确程度,采用实测的岩石力学参数和裂缝形成期的地应力测试数据,可以使模拟计算和裂缝预测结果更接近地质客观实际,为研究区的油气勘探提供新的地质依据。

致谢:塔中地区上奥陶统地应力测量和岩石力学性质参数分析测试工作分别由中国地质科学院地质力学研究所岩石声发射实验室和北京科技大学土木工程岩土实验室完成,在此表示感谢。

参考文献

- [1]顾家裕,方辉,蒋凌志.塔里木盆地奥陶系生物礁的发现及其意义[J].石油勘探与开发,2001,28(4):1-3.
- [2]刘延莉,樊太亮,薛艳梅,等.塔里木盆地塔中地区中、上奥陶统生物礁滩特征及储集体预测[J].石油勘探与开发,2006,33(5):562-565.
- [3]赵明,樊太亮,于炳松,等.塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层裂缝发育特征及主控因素[J].现代地质,2009,23(4):700-718.
- [4]郭光辉,李建军,杨栓荣,等.塔里木盆地中部地区奥陶纪碳酸盐岩裂缝与断裂的分形特征[J].地质科学,2002,37(增刊):51-56.
- [5]郭光辉,李建军,卢玉红.塔中Ⅰ号断裂带奥陶系灰岩裂缝特征探讨[J].石油学报,1999,20(4):19-24.
- [6]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,1997:138-140.
- [7]王喜双,李晋超,王绍民,等.塔里木盆地构造应力场与油气聚集[J].石油学报,1997,18(1):23-27.
- [8]宋慧珍,贾承造,欧阳建,等.裂缝储层研究理论与方法[M].北京:石油工业出版社,2001:288-304.
- [9]秦启荣,张烈辉,邓辉,等.古构造应力场值确定及其在构造地质建模中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(23):3979-3983.
- [10]丁文龙,林畅松,漆立新,等.塔里木盆地巴楚隆起构造格架及形成演化[J].地学前缘,2008,15(2):242-252.
- [11]谭成轩,王连捷,孙宝珊.含油气盆地三维构造应力场数值模拟方法[J].地质力学学报,1997,3(1):71-80.
- [12]魏国齐,贾承造,宋惠珍,等.塔里木盆地塔中地区奥陶系构造-沉积模式与碳酸盐岩裂缝储层预测[J].沉积学报,2000,18(3):408-413.
- [13]张帆,贺振华,黄德济,等.预测裂隙发育带的构造应力场数值模拟技术[J].石油地球物理勘探,2000,35(2):154-163.
- [14]唐湘蓉,李晶.构造应力场有限元数值模拟在裂缝预测中的应用[J].特种油气藏,2005,12(2):25-29.
- [15]丁原辰.声发射法古应力测量问题讨论[J].地质力学学报,2000,6(2):45-52.
- [16]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.
- [17]丁原辰,张大伦.声发射抹录不净现象在地应力测量中的应用[J].岩石力学与工程学报,1991,10(4):331-326.