

塔里木盆地超深缝洞型碳酸盐岩储层地质力学孪生建模技术及其应用

刘敬寿¹, 田博涵¹, 张滨鑫^{1,2}

[1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 中国石化勘探分公司, 四川 成都 610041]

摘要:超深碳酸盐岩地层广泛发育断裂控制的缝洞型储层,其形成和分布与地应力状态紧密相关。缝洞型碳酸盐岩储集体兼具离散介质与连续介质特性,传统的地质力学建模方法难以精确预测此类储层的应力场。结合地震属性反演技术,建立了缝洞型储层岩石力学参数分布模型,并构建了缝洞型储层地质力学非均质模型,实现了兼具缝洞体几何形态与力学属性相似的双重孪生建模,预测了复杂缝洞型储层地应力场及活动性分布。地质力学孪生建模技术,能在有限元软件中复原地下缝洞体的真实几何形态。研究表明:①不同类型缝洞体具有差异化应力场特征,隆起型缝洞体在主干断裂挤压段非均质性较强,具有明显的应力分段特征;下嵌型缝洞体具有明显的垂向应力差异,应力非均质性强;组合型缝洞体应力非均质性为中等,杂乱型和孤立型缝洞体具有相对均匀的应力特征。②缝洞体会显著影响岩石力学强度与应力的分布,溶洞附近应力降低幅度最大,缝洞体附近应力降低幅度次之,裂缝附近应力降低幅度最小。③不同类型缝洞体活动性不同,隆起型缝洞体与下嵌型缝洞体活动性最强,组合型缝洞体次之,杂乱和孤立型缝洞体最弱。

关键词:地质力学建模;孪生建模;地应力;超深层;缝洞型储层;碳酸盐岩;富满油田;塔里木盆地

中图分类号:TE344

文献标识码:A

Geomechanical twin modeling for ultradeep fractured-vuggy carbonate reservoirs and its application in the Tarim Basin

LIU Jingshou¹, TIAN Bohan¹, ZHANG Binxin^{1,2}

[1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Exploration Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China]

Abstract: Fault-controlled fractured-vuggy reservoirs are extensively developed in ultradeep carbonate strata, and their formation and distribution are closely related to the in situ stress state. Since fractured-vuggy carbonate reservoirs exhibit the characteristics of both discrete and continuous media, conventional methods for geomechanical modeling often struggle to accurately predict stress fields in these complex reservoirs. Using seismic attribute-based inversion, we establish a model to characterize the distribution of rock mechanical parameters of fractured-vuggy reservoirs. Then, a geomechanical heterogeneity model for these reservoirs is developed, achieving both geometric and mechanical similarities between the geological and geomechanical models of fractured-vuggy rock masses (i. e., twin modeling). Accordingly, the in situ stress field distribution and activity of complex fractured-vuggy reservoirs are predicted. The geomechanical twin modeling technique enables the reproduction of actual geometric morphologies of subsurface fractured-vuggy rock masses using finite element software. The results indicate that different fractured-vuggy rock mass types exhibit distinct stress field characteristics. Among these, uplifted fractured-vuggy rock masses show strong stress heterogeneity in the compressional segments of major faults, resulting in distinct stress segmentation. Similarly, embedded fractured-vuggy rock masses exhibit significant differences in vertical stress, also suggesting strong stress heterogeneity. In contrast, combined fractured-vuggy rock masses display moderate stress heterogeneity, while chaotic and isolated fractured-vuggy rock masses

收稿日期:2025-04-02;修回日期:2025-07-02。

第一作者简介:刘敬寿(1989—),男,教授、博士研究生导师,储层地质力学、储层裂缝表征和预测、油区构造解析。E-mail: liujingshou@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42572151,42102156);国家科技重大专项(2025ZD1401403);中国地质大学(武汉)“地大学者”人才岗位科研启动经费项目(2022046)。

show uniform stress distribution. Fractured-vuggy rock masses exert significant impacts on rock mechanical strength and stress magnitude. Specifically, karst caves show the highest decreased magnitude of stress at their periphery, followed by fractured-vuggy rock masses, with the periphery of fractures exhibiting the lowest decreased magnitude. Additionally, different types of fractured-vuggy rock masses exhibit varying activity. The domed and down-dipping types exhibit the strongest activity, succeeded by the combined type, while the chaotic and isolated types prove the least active.

Key words: geomechanical modeling, twin modeling, in situ stress, ultradeep reservoir, fractured-vuggy reservoir, carbonate rock, Fuman oilfield, Tarim Basin

引用格式:刘敬寿,田博涵,张滨鑫. 塔里木盆地超深缝洞型碳酸盐岩储层地质力学孪生建模技术及其应用[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 270–286. DOI: 10. 11743/ogg20260118.

LIU Jingshou, TIAN Bohan, ZHANG Binxin. Geomechanical twin modeling for ultradeep fractured-vuggy carbonate reservoirs and its application in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 270–286. DOI: 10. 11743/ogg20260118.

碳酸盐岩油气资源丰富,以碳酸盐岩为主要储层的大型油气田数量约占全球总数的25%,但其油气产量达全世界油气总产量的60%。近年来,在塔里木盆地发现了全球最深的海相碳酸盐岩油气田,其平均埋深超过7 500 m,地质条件复杂,钻探施工和油气开发均面临巨大的挑战^[1-3]。前期勘探开发实践表明,查明超深层储层(埋深>6 000 m)岩石力学性质、地应力状态以及天然裂缝发育特征,尤其是明确现今地应力及其对缝洞体活动状态的控制作用,有利于认识超深储集层品质和提高油气井产能^[4-7]。目前,前人已对塔北隆起缝洞型储层沉积和构造等方面开展了不同程度的研究,提出了超深走滑断裂带“定地质模式、定地震响应、定活动期次、定强度级别、定组合类型、定储集规模”精细解释描述的“六定”技术^[8-9],但对于缝洞型碳酸盐岩储层地应力场的研究仍然不够深入,特别是缺少针对缝洞型碳酸盐岩储层地应力场分布的预测方法及其影响因素的分析,制约了该区油气勘探开发进程^[10-11]。因此,开展缝洞型碳酸盐岩储层现今地应力场预测方法研究,分析地应力场分布规律及其控制因素,可为缝洞型碳酸盐岩油气藏高效勘探开发提供指导。

塔里木盆地超深碳酸盐岩储层经历多期构造运动,走滑断裂发育,地应力复杂多变^[12-14],目前对于沿走滑断裂破碎带地应力呈条带状分布的控制机理尚不明确。部分学者利用测井资料,构建单井岩石力学参数和地应力的一维模型^[15-17]。另外,一些研究人员考虑断层、构造形态和岩石力学参数对地应力的影响,利用有限元模拟技术建立裂缝型储层三维模型,预测地应力场三维分布^[18-22]。但由于超深缝洞型碳酸盐岩储层中缝洞体几何形态和结构多样,具有强非均质性,且缝洞型储层本质上是不规则离散介质与连续介质并存的一类储集体类型,传统的建模技术难以实现缝洞体真实雕刻与力学性质重构。目前复杂缝洞体储层地质力学建模

方法尚处于探索阶段,国内外缝洞型储层地质力学建模以二维单体建模或简单三维建模为主^[23-27]。二维单体建模方法能准确地刻画缝洞形态,但无法真实考虑缝洞体周缘的地质力学特征及其三向挤压应力状态。简单三维建模方法目前能够真实地还原和雕刻地下缝洞体的几何形态,描述缝洞的内部结构^[28-33],但无法通过地震属性雕刻缝洞体的真实几何形态在地质力学模型中对其进行重构,也不能结合反演的岩石力学参数分布刻画缝洞体力学性质的非均质特征。因此,开展针对超深缝洞型碳酸盐岩储层地质力学建模方法研究,有助于精准预测复杂缝洞型储层应力场三维分布,为缝洞型碳酸盐岩油气藏勘探开发提供科学指导。

针对超深缝洞型碳酸盐岩储层地质力学建模和地应力场精准预测的难题,本文基于岩心、测井数据及三维地震资料,建立一套超深碳酸盐岩储层缝洞体雕刻方法,实现地下缝洞体真实形态几何建模。利用岩石力学实验与测井数据,明确单井地应力与岩石力学参数大小。结合地震体属性,反演储层岩石力学参数三维分布,从而建立缝洞型储层地质力学非均质模型,最终实现超深缝洞型储层几何形态与力学性质双重孪生建模。最后,结合井点地应力大小和方向,确定地质力学模型的边界载荷条件,预测复杂缝洞型碳酸盐岩储层应力场三维分布,并揭示不同类型缝洞体的活动规律。

1 地质概况

1.1 研究区构造位置与构造演化

富满油田主体坐落在北部坳陷的阿满过渡带,其中满深区块位于塔里木盆地塔北隆起斜坡部位,历经多期构造运动,现今整体构造平缓,表现为西南倾向的

斜坡(图1a)。研究区经历多期构造活动的改造作用,叠加多期次、多类型的岩溶作用,发育由走滑断裂控制的典型碳酸盐岩缝洞型油气藏,是目前塔里木油田原油增储上产的主要领域^[34-39]。

塔北隆起经历了多期构造运动^[40-45]。其中,满深区块位于塔北隆起南部斜坡部位,其构造演化历程与塔北隆起对应,但其构造作用强度相对较低。该区域的构造演化主要经历了中、晚加里东运动差异抬升期,晚海西—印支运动挤压抬升期,燕山—早喜马拉雅运动局部调整期,及晚喜马拉雅运动至今的构造反转期^[46]。塔北隆起在加里东运动中、晚期,由于塔里木板块北缘构造活动形成凸起雏形,区内断裂构造活跃,一间房组—鹰山组内有大量雁列分支断裂发育,并连接生长形成走滑断裂体系。早海西期之前,发育第Ⅰ期埋藏岩溶作用。海西—印支运动期间,塔北地区发育逆冲推覆构造和巨型左行走滑构造变形带,满深区块奥陶系主干走滑断裂复活,晚海西期开始发育第Ⅱ期埋藏岩溶作用。喜马拉雅运动期,伴随第Ⅲ期埋藏岩溶作用,现今构造格局形成,其隆起格局最终定型。

1.2 富满油田断裂体系分布特征

富满油田走滑断裂具有典型分区分带特征

(图1b)。塔北隆起哈拉哈塘油田发育多组NW和NE走向“X”组合形式的断裂。加里东中、晚期—海西期,多组“X”型断裂体系均发生活动;而喜马拉雅期仅NE走向断裂发生活动,NW走向断裂几乎未发生活动。英买力凸起主要发育NW走向断裂,向南可延伸至阿满过渡带。轮南凸起整体以NE走向断裂为主,东部发育少量近南北向断裂。塔中隆起北部斜坡部位走滑断裂主要发育NE走向断裂,逆冲断裂从东南向西北呈帚状发散分布,整体以NW走向为主,且平面上被NE走向断裂体系错断,同样呈现出“X”组合形式的复合断裂体系。中部阿满过渡带走滑断裂同时受塔北隆起与塔中隆起断裂体系的影响,区域内发育了多条断裂构造。阿满过渡带以 F_15 断裂为中心,可划分为西侧NW走向与东侧NE走向两条断裂体系。西侧区域发育一系列NW走向断裂,向北延伸至英买力凸起,向南终止于 F_15 断裂之上或延伸至塔中隆起。东侧区域整体以NE走向断裂为主,部分向北可延伸至塔北隆起,向南终止于 F_15 断裂之上或延伸至塔中隆起。总体而言,富满油田走滑断裂类型多样,表现为多期次的挤压变形特征,具有“纵向分层、平面分段、垂向多期叠加”的三维空间结构特征^[48]。

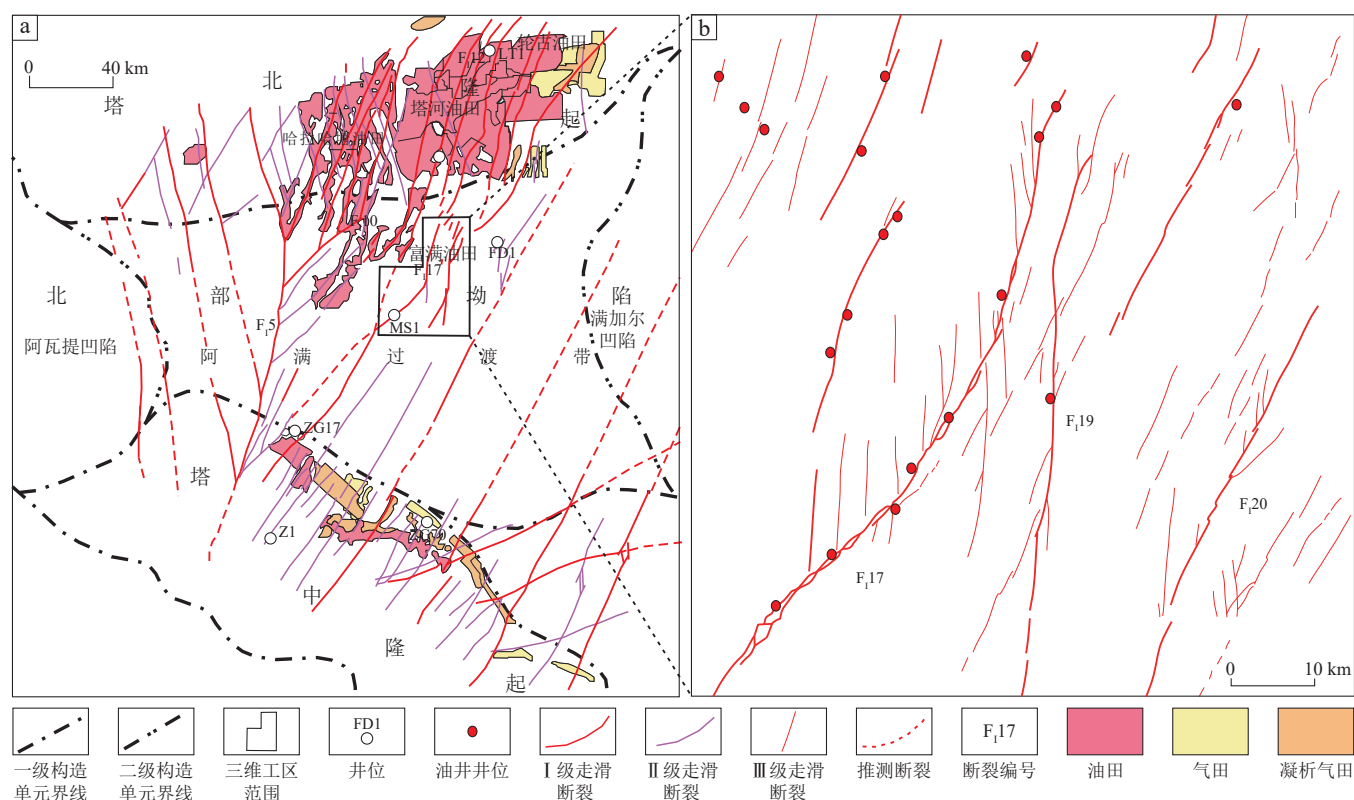


图1 塔里木盆地富满油田区域构造位置(a)及主要断裂分布(b)(据文献[47]修改)

Fig. 1 Tectonic location (a) and major fault distribution (b) of the Fuman oilfield, Tarim Basin (modified after reference [47])

2 超深层缝洞型碳酸盐岩储层发育特征

2.1 缝洞体岩心与测井发育特征

超深缝洞型碳酸盐岩储层主要发育孔、洞、缝3大类储集空间,储层类型以溶蚀孔洞型、裂缝-孔洞型及裂缝型储层为主^[49]。岩心上可以观察到溶蚀孔洞发育,但通常尺度较小,长度一般在6 cm以下,宽度介于2~30 mm,大多数溶蚀孔洞充填方解石、白云石及砂泥等碎屑矿物。研究区构造裂缝发育,其中构造裂缝

约占总裂缝的80%,产状多为垂直裂缝,发育的张裂缝和剪裂缝比例相近,充填裂缝约占31%,大部分裂缝为未充填缝(图2),裂缝互相交切形成复杂网络,具有较好的空间连通性。利用满深区块成像测井资料,明确研究区主要发育溶蚀孔洞型、裂缝-孔洞型及裂缝型储层。溶蚀孔洞在成像测井上为不规则圆状或椭圆状暗色斑点,裂缝-孔洞型储层兼具溶蚀孔洞和裂缝型储层的特点,图像中常见正弦形态的裂缝及少量不规则圆形或椭圆形的暗色斑点,裂缝在成像测井上显示为暗色正弦曲线。当裂缝为低角度缝时,呈不规则暗线,当裂缝为斜角缝时,呈单一暗色正弦曲线,当裂缝为网状缝时,为不规则线段组合。

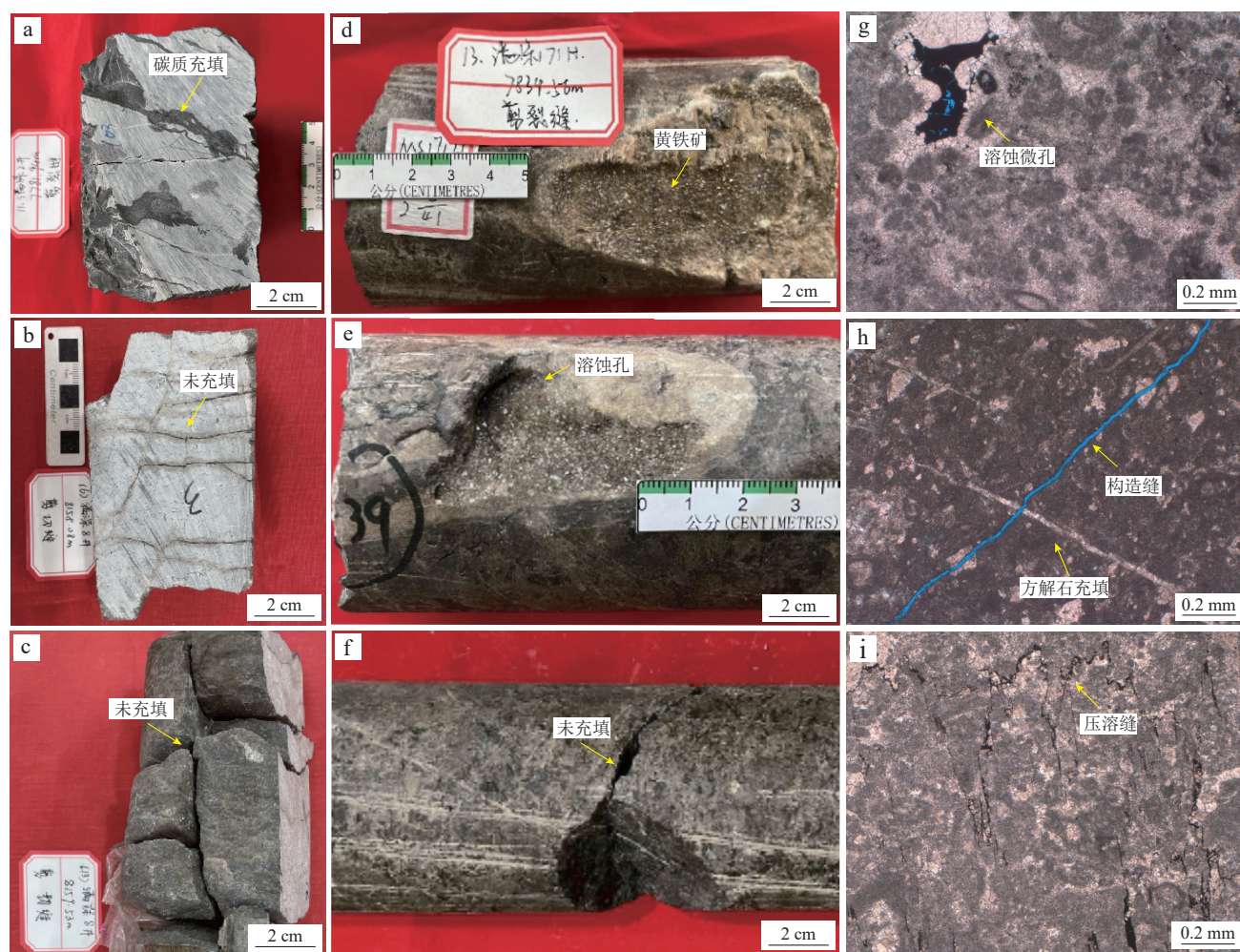


图2 塔里木盆地满深井区一间房组裂缝特征显微照片

Fig. 2 Cores images and micrographs showing the fracture characteristics of the Yijianfang Formation in the Manshen well block, Tarim Basin

a. ManS2井,岩心,剪切缝,浅灰色碳质灰岩,炭质充填,埋深7 781.94 m; b. ManS8井,岩心,剪切缝,灰色灰岩,未充填,埋深8 158.08 m; c. ManS8井,岩心,剪切缝,灰色灰岩,两期裂缝,未充填,埋深8 157.53 m; d. ManS171H井,岩心,剪切缝,深灰色灰岩,黄铁矿充填,埋深7 834.06 m; e. ManS171H井,岩心,剪切缝,泥晶灰岩,溶蚀孔洞,埋深7 837.52 m; f. ManS171H井,岩心,剪切缝,泥晶灰岩,两期裂缝,埋深7 610.81 m; g. ManS8井,蓝色铸体薄片,粒间不规则溶蚀微孔发育,埋深8 163.56 m; h. ManS8井,蓝色铸体薄片,早期构造缝方解石全充填,后期未充填构造缝切割早期缝,埋深8 163.80 m; i. ManS8井,蓝色铸体薄片,锯齿状压溶缝发育,埋深8 163.10 m

2.2 超深缝洞体三维分布规律

采用地震敏感属性体、地震测井联合波阻抗反演体及地震相约束下的缝洞型储层建模方法,对缝洞体三维几何形态与有效储层空间分布进行雕刻^[50-51]。通过计算不同储层类型的有效储集空间,定量表征缝洞体规模。利用钻时、放空及漏失信息,以张量外部轮廓为约束进行波阻抗反演,以由地震剖面信息、张量属性信息及正演分析得到的波阻抗值为阈值,雕刻裂缝和溶洞的三维特征。最大似然属性对走滑断层的深部断裂有良好的表征,能够清晰地反映走滑断层深部的形态特征,但对走滑断层上部的识别较弱。反演孔隙度

属性对走滑断层上部的花状分支断裂有良好的反映,但对走滑断层深部断裂反映较少或无反映。因此研究区采用最大似然属性和反演孔隙度属性联合雕刻缝洞体,通过井-震对比,优选最大似然属性值介于0~0.045、孔隙度属性值大于0.06的结构单元为缝洞体(图3)。满深区块的缝洞体主要沿断裂分布,主干断裂附近缝洞体复杂、体积大,分支断裂附近缝洞体发育简单、体积较小。不同走滑段的缝洞体具有不同的几何形态特征,根据缝洞体的几何性质可将其分为5类,分别为隆起型缝洞体、下嵌型缝洞体、组合型缝洞体、杂乱型缝洞体和孤立型缝洞体。隆起型缝洞体常出现在走滑断裂的挤压区,缝洞体发育范围窄。下嵌型缝洞

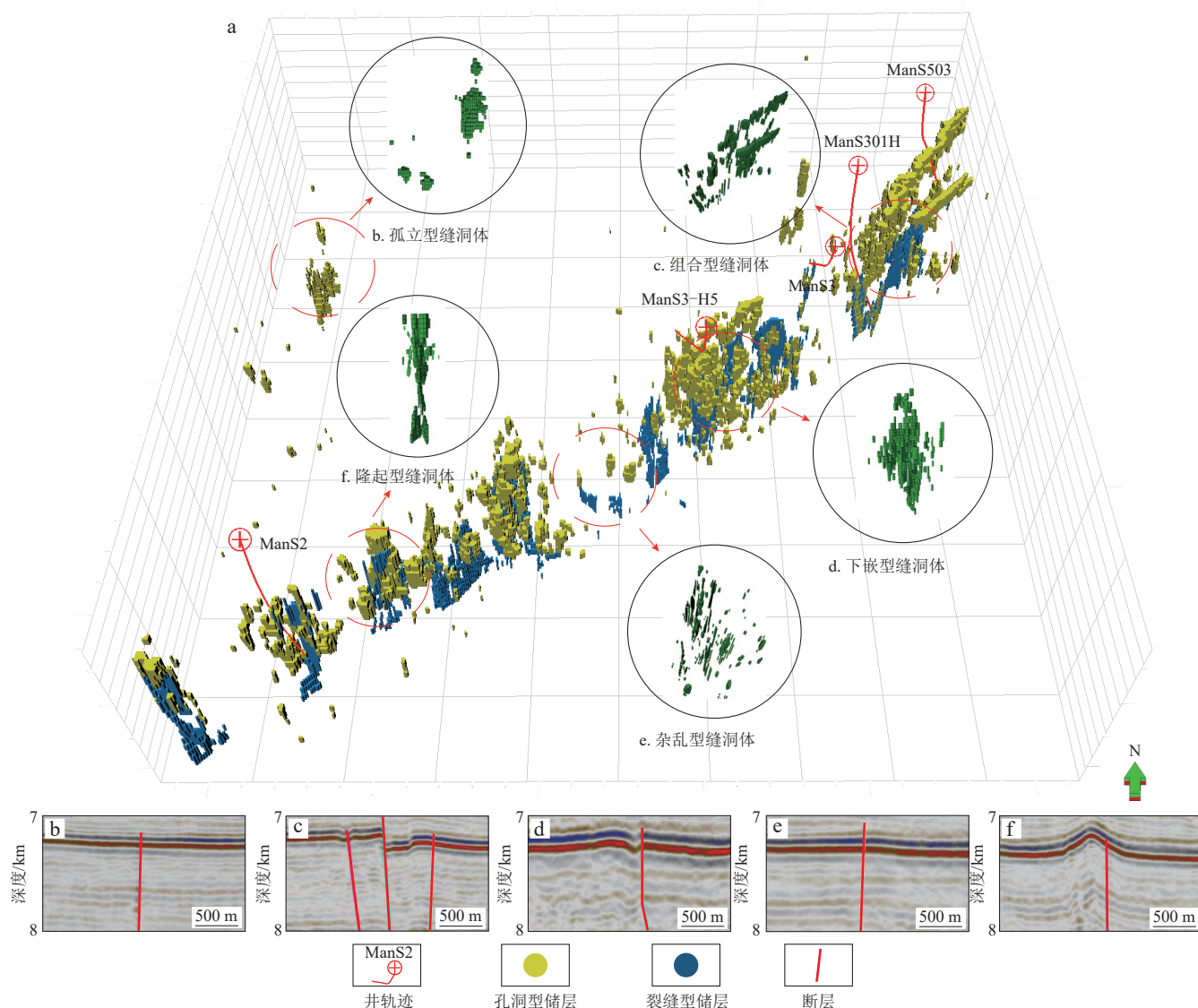


图3 塔里木盆地满深井区缝洞体雕刻模型与形态分类

Fig. 3 Carving models and morphological classification of fractured-vuggy rock masses in the Manshen well block, Tarim Basin

a. 缝洞体雕刻模型; b. 孤立型缝洞体; c. 组合型缝洞体; d. 下嵌型缝洞体; e. 杂乱型缝洞体; f. 隆起型缝洞体

(b—f代表地震解释剖面。)

体常出现在走滑断裂伸展区,缝洞体发育范围宽。组合型缝洞体常出现在走滑断裂的组合断层中,缝洞体的发育受多条断层影响,缝洞体形态具有多样性。杂乱型缝洞体常出现在弱走滑运动区,缝洞体呈零散分布。孤立型缝洞体常出现在弱构造运动区中,缝洞体为溶洞零散分布。

3 储层地质力学孪生建模的内涵与流程

3.1 地质力学孪生建模的内涵

超深缝洞型碳酸盐岩储层地应力场精准预测的关键在于利用有限元模拟等技术手段,准确雕刻地下缝洞体真实几何形态,表征不同类型缝洞体岩石力学性质的差异性,从而实现离散介质与连续介质的一体化建模。本文提出的复杂缝洞体三维地质力学“孪生”建模包含几何孪生建模与力学性质孪生建模双重含义。目前复杂缝洞体地质力学建模研究正处于探索阶段。传统应力场模拟通常是建立均质的力学模型或连续介质的非均质模型,难以在雕刻复杂缝洞体结构的同时建立地质力学非均质模型,因此均质力学模型和连续非均质介质模型均不能满足模拟精度要求;对于缝洞体复杂形态的建模,虽然能真实地还原地下缝洞体的几何形态,描述缝洞的内部结构,但目前仍然无法突破不规则离散介质与连续介质一体融合建模的技术瓶颈,导致传统的地质力学建模方法应用受限。本文采用地质建模与有限元模拟联合建模的思路,提出了适用于复杂缝洞体地质力学模拟的孪生建模方法,解决了不规则离散缝洞体的地质力学建模技术难点。其目的是结合地质建模软件与有限元模拟软件的优势,将地质模型中的几何形态和参数转化到有限元模拟模型中。在本文中,地质建模与有限元模拟软件分别使用 Petrel 和 ANSYS 软件。采用编程手段,将 Petrel 构建的地质模型信息(几何形态信息、岩石力学参数信息),完整置入 ANSYS 地质力学模型中,刻画不规则的离散缝洞体,进而减少建模时的精度误差,实现缝洞体地质模型与地质力学模型在几何学和力学方面的双重相似,该过程即为孪生建模。

将地质力学孪生建模过程中的难点和技术瓶颈总结为5个方面:①如何真实还原缝洞体几何形态,构建不规则的离散单元体,即如何将缝洞体的几何形态转化到与其几何形态相同的地质力学模型中,实现在有限元软件中构建不规律离散介质体;②不科学的地质体如何进行自动镂空,即如何剔除在地震属性雕刻中

存在、但在力学上不稳定的缝洞单元体;③如何提高建模精度,实现缝洞体地应力网格形状与地质模型网格形状相匹配;④复杂构造模型在三维地应力模拟时的适应性,即地应力网格划分是否高效、灵活;⑤如何实现缝洞体地质力学模型的非均质化,即如何刻画不同类型缝洞体力学性质的非均质特征。

3.2 地质力学孪生建模的流程

针对上文所述的缝洞体地质力学建模难点,提出了复杂缝洞体三维地质力学孪生建模技术流程,具体实现思路如图4所示。①利用三维地震资料反演不同的属性,例如最大似然属性和孔隙度属性等。结合地震多属性反演结果,以成像测井为约束,精细雕刻缝洞体几何形态,实现缝洞体储层地质几何建模。②利用测井数据与岩石力学实验计算岩石力学参数大小,依据成像测井中缝洞体形态和发育位置,验证测井计算的岩石力学参数大小是否可靠。以测井数据为约束,通过地震多属性检测、剔除和筛选后,建立岩石力学参数模型。③开展缝洞型储层地质力学网格诱导划分,确保划分的地质力学网格形状与缝洞体几何形态基本一致,得到缝洞型储层地质力学均质模型。④采用“锯齿化”处理的建模方法,还原不同类型缝洞体的几何形态,将缝洞体地质连续网格模型转换为地质力学非均质、不连续网格模型,实现地质力学孪生建模。图5a为“锯齿化”建模示意图,将不规则的缝洞体通过锯齿化的编程处理手段,雕刻为锯齿状、规则几何面拼合的复杂缝洞体,以确保在有限元模型中建立不规则、离散的缝洞体。图5b为截取的部分缝洞体地质模型,图5c为“锯齿化”处理的缝洞体地质力学孪生模型,可以判断建立的缝洞体地质力学孪生模型与地质模型的形态几无差异,进而建立缝洞型储层地质力学均质-各向异性模型,且对其地质体力学合理性判别。采用内置不同方向的虚拟结构面(节点和线段组成的虚拟层面),引导地应力网格自由划分的方向和尺寸,使地应力网格划分更加高效、灵活,同时节省运算内存。对于不符合力学合理性的单元体,判别每个单元体或者几个单元体的组合是否处于悬空状态,若单元体处于悬空的状态,则将单元体剔除,以免导致后期有限元应力场数值模拟中造成大尺度位移,无法得到储层三维应力场分布。结合岩石力学参数地震反演结果,将均质模型逐个单元体修改为地质力学非均质模型,进而建立缝洞型储层地质力学非均质-各向异性模型。最后,依据现今地应力大小和方向,确定模型边界载荷与位移约束条件,预测缝洞型储层三维应力场分布。

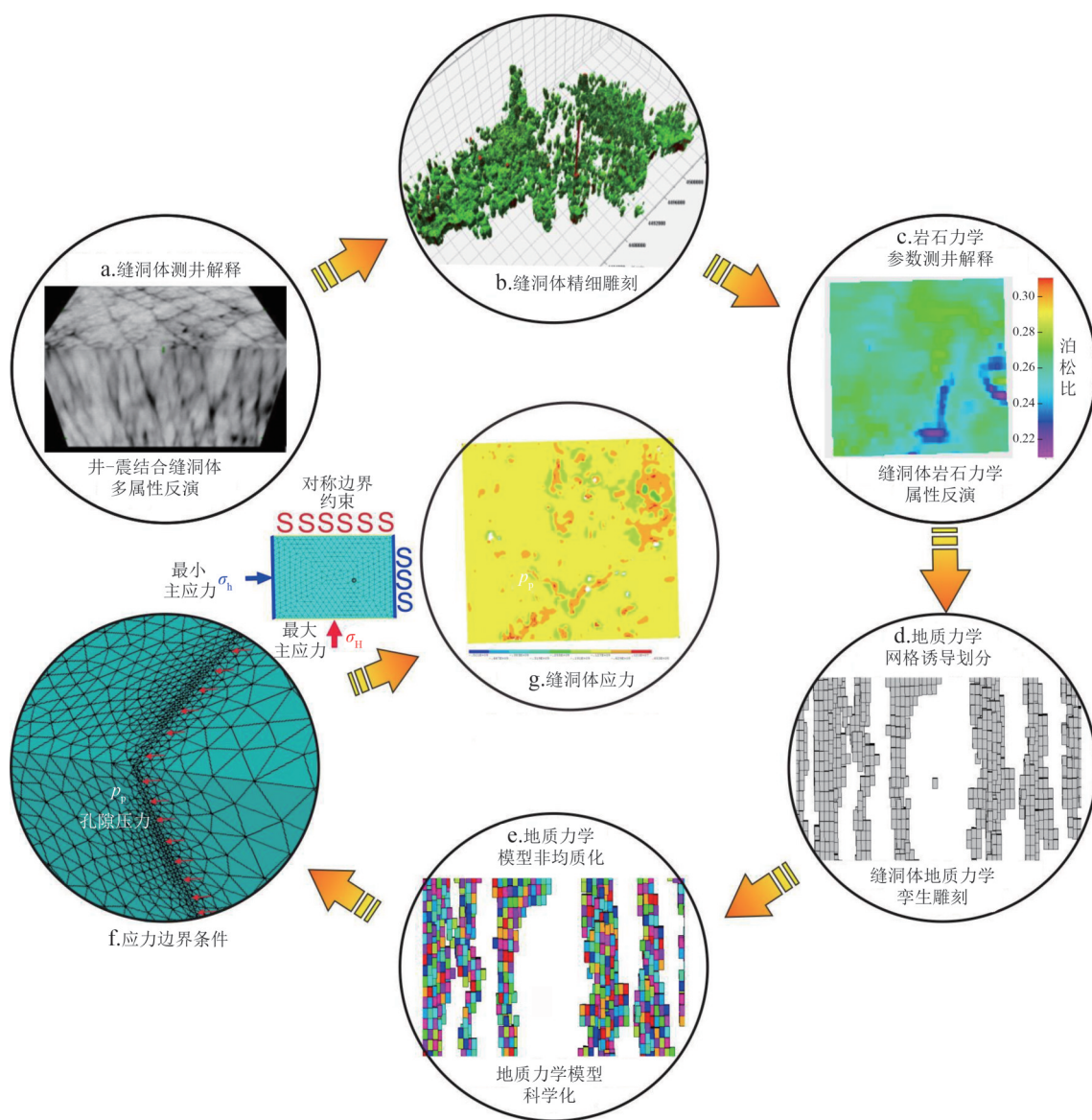


图4 复杂缝洞体三维地质力学孪生建模技术流程

Fig. 4 Flow chart for three-dimensional geomechanical twin modeling of complex fractured-vuggy rock masses

4 地应力大小与方向及岩石力学参数的获取

4.1 岩石力学参数与地应力测井评价

利用研究区诱导裂缝和井壁崩落方位确定了现今地应力方向。研究区现今地应力方向为NNE18°。结合测井资料计算单井力学参数,采用井-震结合方法,通过地质力学建模,以测井中的缝洞体附近应力下降值和下降范围为约束,预测现今地应力三维分布。单井应力计算结果表明,在缝洞体附近,应力呈现不同程度的下降。例如,ManS4井的平均垂向应力为171.3 MPa,平均最大水平主应力为150.0 MPa,平均最小水平主应力为130.1 MPa。

4.2 地应力垂向分布规律

对比成像测井与地震剖面(图6)发现,ManS4井主要发育溶蚀孔洞型和裂缝-孔洞型储层,ManS4井目的层位上段主要为裂缝-孔洞型,最大似然与孔隙度属性为高值,应力下降的幅度中等。ManS4井目的层位中下段为溶蚀孔洞型,应力下降幅度最大。缝洞体的形态与类型均会影响应力的大小,在溶蚀附近,地应力降低的幅度最大,下降值可达16 MPa;缝洞体附近,应力降低幅度次之,下降值约为12 MPa;而在裂缝附近,应力降低幅度最小,下降值约为4 MPa。单井对比结果表明,基于地质力学孪生建模方法,可以有效地刻画缝洞体周缘的应力状态,反演的岩石力学参数与单井测井曲线基本一致。此外,基于数值模拟确定的地应

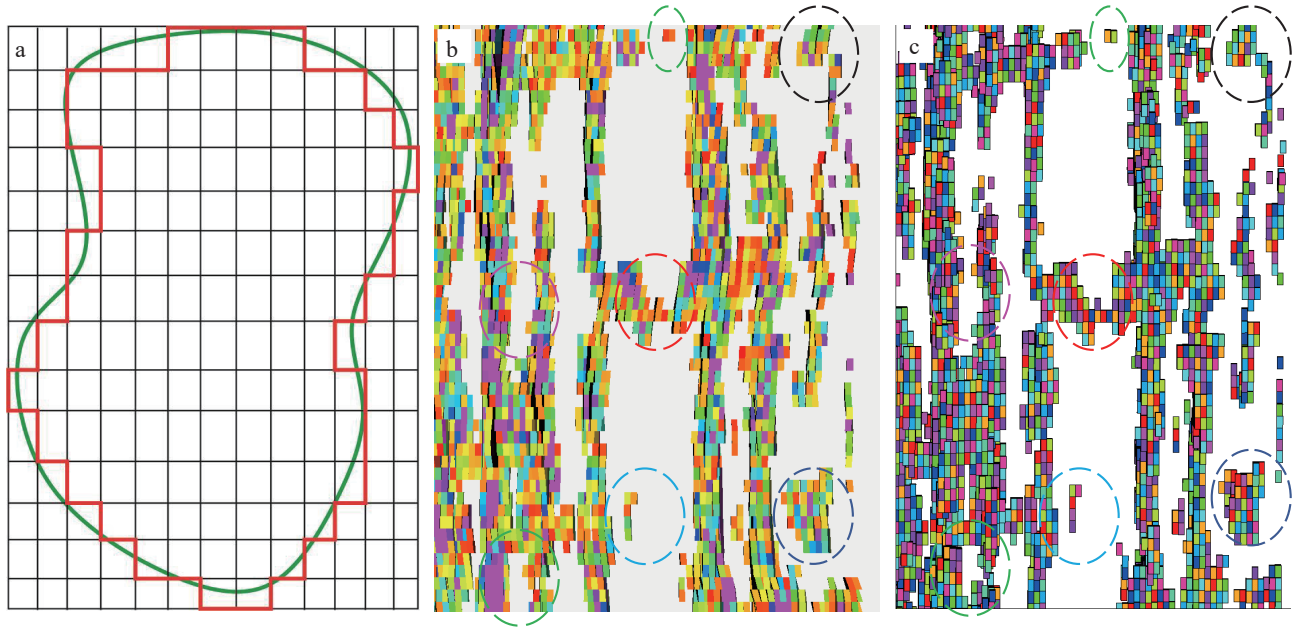


图5 缝洞型储层“锯齿化”建模示意图及效果图

Fig. 5 Schematic and rendering of serrated modeling of fractured-vuggy reservoirs

a. 锯齿化建模示意图; b. 缝洞体地质模型; c. 缝洞体有限元几何模型

(红线代表缝洞体网格边界; 绿线代表缝洞体边界; 不同颜色的色块均代表网格; 不同颜色的圆圈均代表缝洞体网格处理部位。)

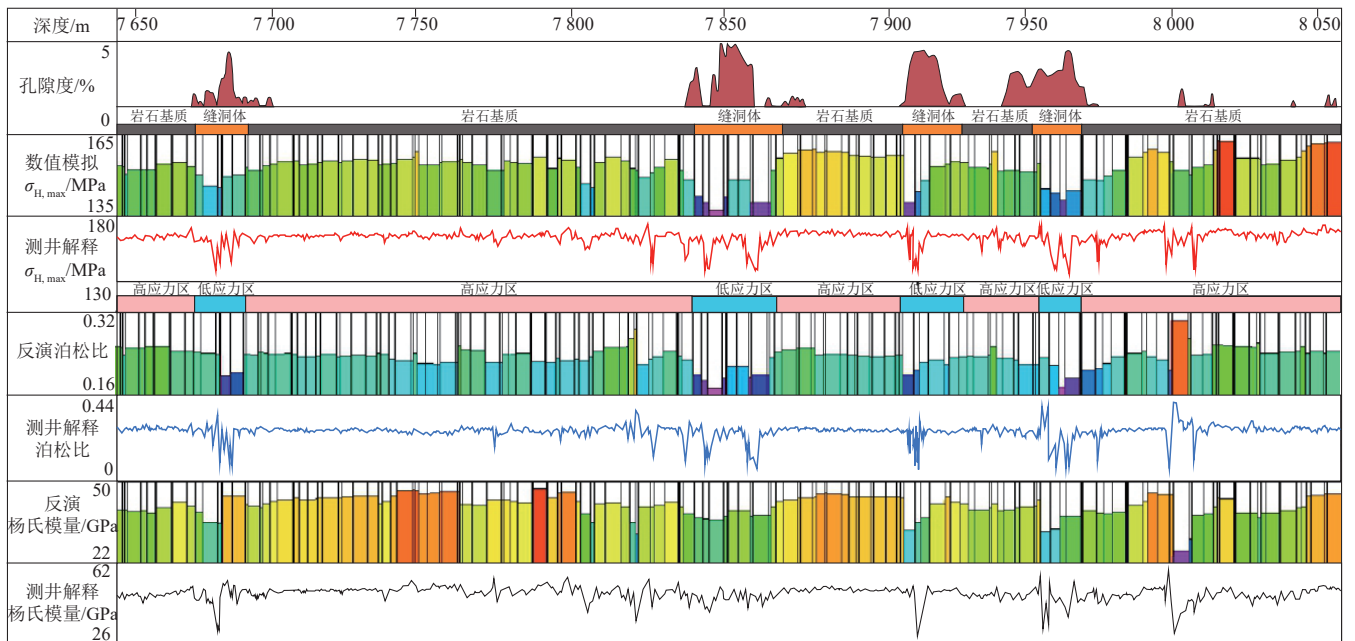


图6 塔里木盆地 ManS4 井岩石力学参数及应力计算结果

Fig. 6 Calculated rock mechanical parameters and in situ stress of well ManS4, Tarim Basin

 $\sigma_{H, \max}$. 最大水平主应力

力参数下降的幅度和范围与测井解释结果匹配良好,这也从侧面印证了本文所提出的方法在缝洞型储层中具有较强的实用性和可靠性。

4.3 地应力平面分布规律

数值模拟结果(图7)表明,缝洞体附近应力为低

值,在缝洞体周围应力会下降约 12 MPa。不同方向断裂附近应力下降程度不一,其中北东向断裂附近应力下降幅度最大,即平行于最大水平主应力方向的断裂附近应力值最低。北西向断裂应力降低幅度最小,缝洞体附近应力为点状分布。根据断裂走向上不同部位应力状态的差异,将研究区断裂系统划分为挤压段、转

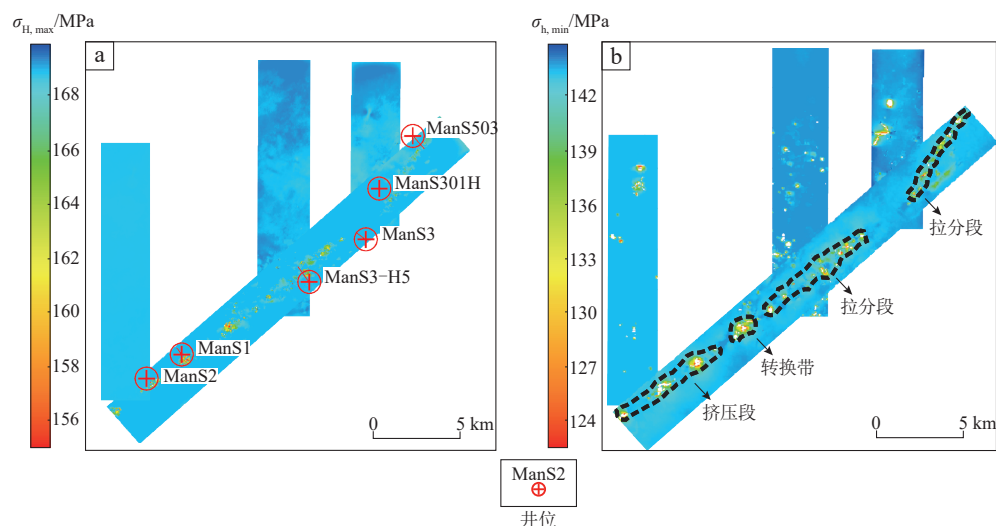


图7 塔里木盆地满深井区应力场模型

Fig. 7 Stress field model of the Manshen well block, Tarim Basin

a. 最大水平主应力($\sigma_{H, \max}$); b. 最小水平主应力($\sigma_{h, \min}$)

(黑色虚线代表应力状态边界;蓝色部分代表最大/最小水平主应力。)

换带和拉分段。挤压段的应力分布呈现零星特征,局部非均质变化较强;拉分段的应力则表现为线状分布,局部非均质变化强。挤压段至拉分段之间的转换带应力值较低,应力降低幅度通常超过10 MPa。

5 不同类型缝洞体现今地应力分布规律

5.1 研究区缝洞体构造分区

通过对比发现,不同类型断裂处缝洞体的应力响

应存在明显差异。因此,本文分别对满深井区主干断裂与分支断裂附近缝洞体的应力响应特征开展精细表征。具体细分为4条主干断裂带和3条次级断裂带(图8),并总结了7条断裂带的地应力场分布特征,以更深入理解区域内缝洞体的地质力学响应特征。

5.2 不同断裂带地应力场分布规律

①号断裂带位于挤压段,缝洞体类型为隆起型,代表井为 ManS2 井,累产油量 3.2×10^4 t, 为高产量区(图9a)。数值模拟得到的最大水平主应力与最小水平主应力分布规律类似,因此本文主要分析最小水平

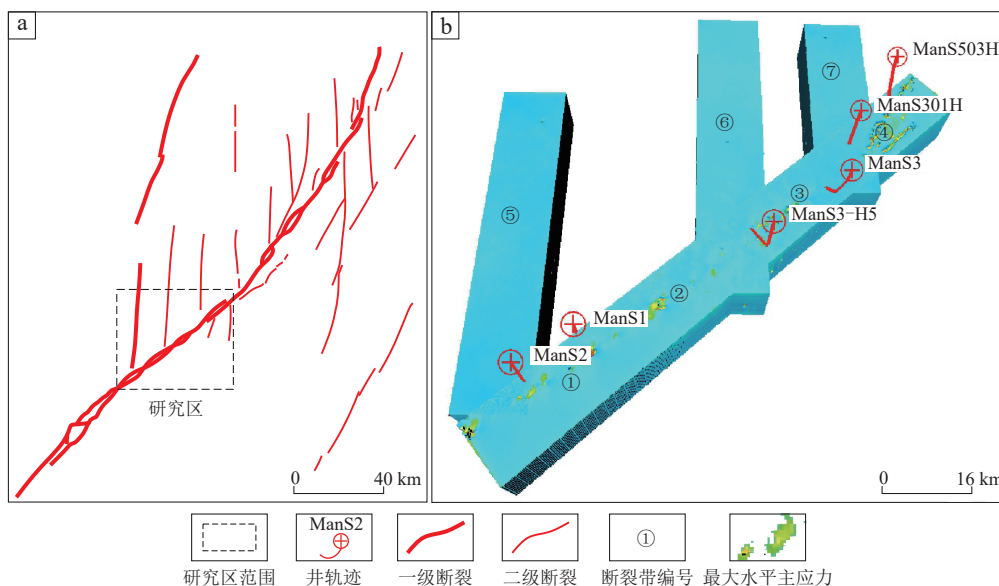


图8 塔里木盆地满深井区断裂带(a)与缝洞体(b)分布

Fig. 8 Segmentation of fault zones (a) and fractured-vuggy rock masses (b) in the Manshen well block, Tarim Basin

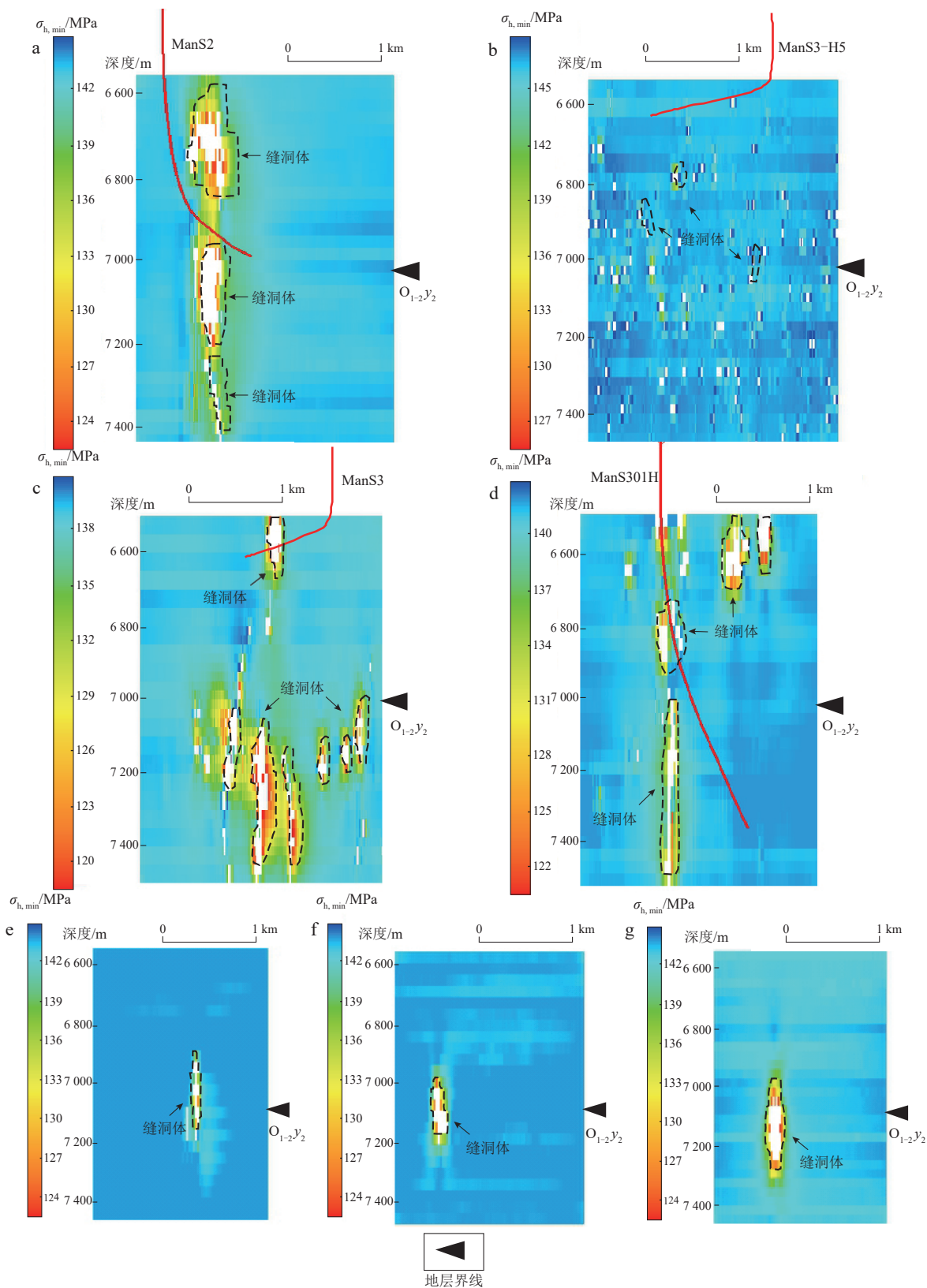


图9 塔里木盆地满深井区不同剖面最小水平主应力(σ_{hmin})分布

Fig. 9 Profiles showing the distributions of minimum horizontal principal stress (σ_{hmin}) in the Manshen well block, Tarim Basin

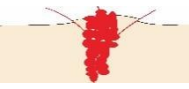
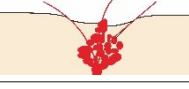
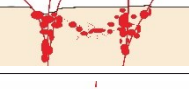
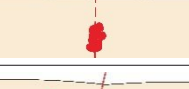
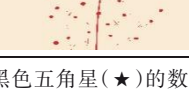
a. 过 ManS2 井最小水平主应力剖面, ①号断裂带; b. 过 ManS3-H5 井最小水平主应力剖面, ②号断裂带; c. 过 ManS3 井最小水平主应力剖面, ③号断裂带; d. 过 ManS301H 井最小水平主应力剖面, ④号断裂带; e. ⑤号次级断裂带最小水平主应力剖面; f. ⑥号次级断裂带最小水平主应力剖面; g. ⑦号次级断裂带最小水平主应力剖面 (断裂带位置见图 8b.)

主应力的展布规律。受缝洞体形状与体积大小的影响,最小水平主应力横向与垂向分布差异性显著,断裂附近应力降幅约为 15 MPa,表现为串珠状低应力值连片分布。最小水平主应力沿断层延伸方向具有分段变化的特征。②号断裂带位于平移段,缝洞体类型为杂乱型,代表井为 ManS3-H5 井,累产油量 2.2×10^4 t,为低产量区(图 9b)。垂向上,该区域不同深度处的最小水平主应力差异较小,局部零星变化约 3 ~ 6 MPa。沿着断层延伸的方向,最小水平主应力并未表现出明显的差异性,仅在局部区域以条带状的形式分布。在剖面上,应力变化特征与平面类似。③号断裂带位于拉分段,缝洞体类型为下嵌型,代表井为 ManS3 井,累产油量 10.0×10^4 t,为高产量区(图 9c)。该区域的最小水平主应力在垂向上差异最为显著,尤其是在中间层段,应力变化幅度大,最大降幅约为 18 MPa,平面上最小水平主应力大小沿断层延伸方向表现出明显的分段性差异。根据剖面分析,断裂局部位置存在明显的应力壳,即应力集中的现象。不同位置最小水平主应力大小差异明显,尤其在断裂带附近,应力降低幅度最大,受下嵌型缝洞体的影响最为显著,导致该区域应力表现为强烈的非均质性。④号断裂带位于平行断层组合段,缝洞体类型为组合型,代表井为 ManS301H 井,累产油量 2.6×10^4 t,为中等产量区(图 9d)。该区域最小水平主应力存在一定的差异,缝洞体附近应力降低约 15 MPa。最小水平主应力沿断层延伸方向表现出明显的分段性差异,剖面上应力的变化规律与平面类似,表现为强烈的非均质性。⑤—⑦号断裂带为次级断裂,应力降低幅度与降低范围明显小于主干断裂。相较于主干断裂,缝洞体的发育程度较低,以孤立型为主,零散分布,其应力值降低幅度介于 5 ~ 8 MPa(图 9e—g)。该区域的最小水平主应力在垂向上不同深度差异不明显。在剖面上,不同形状的缝洞体对应力大小的影响范围不同。总体来看,缝洞体体积越大,应力的降低范围越广,且应力降低幅度也越大。

下嵌型缝洞体多在拉张应力环境下发育,缝洞体类型与形状多变,导致现今地应力降低幅度大,产量也最高。隆起型缝洞体多在挤压应力环境中形成,应力降低幅度同样较大,对应产量同样较高。组合型缝洞体发育平行断裂,应力变化中等,产量同样中等。而孤立型和杂乱型缝洞体区域发育规模小,应力降低幅度和影响范围最小,产量也最低(表 1)。基于地质力学孪生建模方法,可以在有效刻画缝洞体真实几何形态、描述缝洞内部结构的同时,分析其周缘应力状态。

表 1 不同类型缝洞体应力与产量关系

Table 1 Relationships between in situ stress and oil and gas production for different types of fractured-vuggy rock masses

缝洞体分类	剖面特征	断裂应力特征	应力变化	产量
隆起型		挤压型	★★★★	★★★★
下嵌型		拉分型	★★★★★	★★★★★
组合型		平行断裂	★★★	★★★
孤立型		断层弱活动	★	★
杂乱型		拉分型	★★	★★

注:黑色五角星(★)的数量表示应力变化/产量大小等级,其中★数量越多代表等级越高。

6 不同类型缝洞体活动性评价

6.1 缝洞体现今活动性评价方法

受现今应力场的影响,不同位置、不同方位的断裂和缝洞体的潜在活动性不一,活动性的差异直接影响储层的渗透性。对于已知的断裂面或缝洞体,其活动性主要与断裂面受到的正应力、剪应力和摩擦系数有关^[52-55],同时考虑到断裂面或缝洞体本身粗糙度同样影响其活动趋势,因此对于缝洞体镂空后活动性表示方法,此次采用的是“剪正比+粗糙度”毗邻单元体赋值方案。“剪正比”是剪应力与正应力的比值,“粗糙度”为断层面或缝洞体的几何粗糙程度,综合“剪正比”和“粗糙度”两种影响活动性的因素进行缝洞体活动性的计算,其主要参数计算如下。

用空间三维点的坡度均方根 Z_2 作为走滑断层的粗糙度,在同一水平线上,以第 i 个点($i \geq 3$)为起点,取连续 5 个采样点(即点 i 至 $i+4$)来计算梯度,其计算公式为:

$$Z_2 = \left[\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^{M-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{(x_{i+1} - x_i)^2} \right]^{0.5} \quad (1)$$

式中: Z_2 为坡度均方根(粗糙度),无量纲; x_i 和 y_i 分别为断层面轮廓线上第 i 点的 x 坐标和 y 坐标; M 为采样点个数。通过将此 5 点窗口沿水平线向后滑动(起点依次为 $i+1, i+2, \dots$),重复上述梯度计算过程,最终基

于所有梯度值求得该水平线的粗糙度。然后纵向上以相同的方法计算,之后将全部数据归一化处理,消除统计干扰,其计算公式为:

$$\mu = \left| \frac{Z_2 - Z_{2,\min}}{Z_{2,\max} - Z_{2,\min}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式中: μ 为粗糙度指数,%; $Z_{2,\max}$ 为坡度均方根(粗糙度)最大值,无量纲; $Z_{2,\min}$ 为坡度均方根(粗糙度)最小值,无量纲。以水平半径5个单元体对粗糙度面进行等值化处理,进而构建走滑断裂的三维粗糙度模型。

以断裂粗糙度模型、岩石力学参数模型和现今地应力模型3个模型为约束,利用最大和最小水平主应力及垂向应力,计算正应力和剪应力,具体计算公式如下:

$$\sigma = \frac{\sigma_{H,\max} + \sigma_{h,\min}}{2} + \frac{\sigma_{H,\max} - \sigma_{h,\min}}{2} \cos 2\beta \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\sigma_{H,\max} - \sigma_{h,\min}}{2} \sin 2\beta \quad (4)$$

式中: σ 为正应力,MPa; τ 为剪应力,MPa; $\sigma_{H,\max}$ 为最大水平主应力,MPa; $\sigma_{h,\min}$ 为最小水平主应力,MPa; β 为断层与最大水平主应力的夹角,°。

根据临界应力断层(裂缝)假说,断裂面在处于临界滑动状态时具有更好的渗流能力。利用作用于断裂面上的剪应力与有效正应力之比,并引入粗糙度概念,建立走滑断裂活动性预测模型。断裂活动性指数计算公式如下:

$$f_R = \left| \frac{\tau}{\sigma\mu} \right| \quad (5)$$

式中: f_R 为断裂活动性指数,无量纲。

最后将断裂活动性指数进行归一化,其计算公式如下:

$$F_R = \left| \frac{f_R - f_{R,\min}}{f_{R,\max} - f_{R,\min}} \right| \quad (6)$$

式中: F_R 为归一化断裂活动性指数,无量纲; $f_{R,\min}$ 为断裂活动性指数的最小值,无量纲; $f_{R,\max}$ 为断裂活动性指数的最大值,无量纲。断裂活动性指数越大,代表断层活动性越强,反之则越弱。

6.2 缝洞体活动性分布规律

采用上述方法分析了4个主干断裂和3个分支断裂中缝洞体的活动性。如图10a所示,满深井区①号断裂带与缝洞体的活动性明显受缝洞体几何形态的影响,活动性在平面上呈带状分布的特征,缝洞体整体活动性较高。在剖面上,ManS2井钻遇的缝洞体其内部活动强烈但活动范围有限,非均质性强。如图10b所

示,满深井区②号断裂带的特征为零散分布的杂乱型缝洞体。缝洞体活动性在垂向上变化不大。剖面上缝洞体内部活动性几乎没有变化,活动范围最小。如图10c所示,满深井区③号断裂带处于拉分段,该区域以下嵌型缝洞体为主。在垂向上缝洞体活动性差异显著,缝洞体内部变化强烈,活动范围最为广泛。剖面上,ManS3井钻遇缝洞体活动性高值区,缝洞体内部活动强烈且有效范围大。如图10d所示,满深井区④号断裂带处于平行断裂带,特点为组合型缝洞体。该区域深度上活动性差异显著,缝洞体内部变化强烈,活动区域狭窄且延伸较长。剖面上活动性差异明显,整体呈带状分布特征。在剖面上,ManS301H井钻遇缝洞体活动性高值区,缝洞体内部活动强烈但活动范围较为局限。满深井区⑤—⑦号断裂带,属于次级断裂区,主要发育孤立型缝洞体(图10e—g)。这些区域的活动性随深度的变化不大,均一化断裂活动性指数维持在0.1左右,缝洞体内部变化较弱,活动范围十分局限。剖面上活动性整体较低,且断层活动不显著。如图10所示,数值模拟表明,缝洞体附近活动性为高值,总体来看,连片分布的缝洞体活动性最高,均一化断裂活动性指数介于0.20~0.25,孤立存在的缝洞体活动性最低,均一化断裂活动性指数维持在0.10左右。

7 结论

1) 本文提出了一种缝洞型储层地质力学孪生建模方法。该方法基于缝洞体精细雕刻,构建了碳酸盐岩储层地质力学几何模型。结合常规测井与地震反演技术,获取了缝洞型储层三维岩石力学参数分布,建立了缝洞型地质力学非均质模型。在此基础上,将反演得到的不同类型缝洞体的力学性质赋予地质力学模型,实现了缝洞体在几何形态和力学性质上的双重孪生建模,有效突破了不规则离散介质与连续介质一体化融合建模的技术瓶颈。

2) 采用地质力学孪生建模技术,揭示了不同类型缝洞体附近地应力场的分布规律。研究发现,挤压段应力呈零星分布特征,应力非均质性较强;拉分段应力呈线状分布,应力非均质性强;转换带附近应力为低值,应力降低幅度超过10 MPa。隆起型缝洞体在主干断裂挤压段表现出较强的应力非均质性,并具有明显的应力分段特征;下嵌型缝洞体则显示出显著的垂向应力差异,应力非均质性亦较强;组合型缝洞体的应力非均质性为中等;杂乱型和孤立型缝洞体则呈现出相对均匀的应力分布特征。

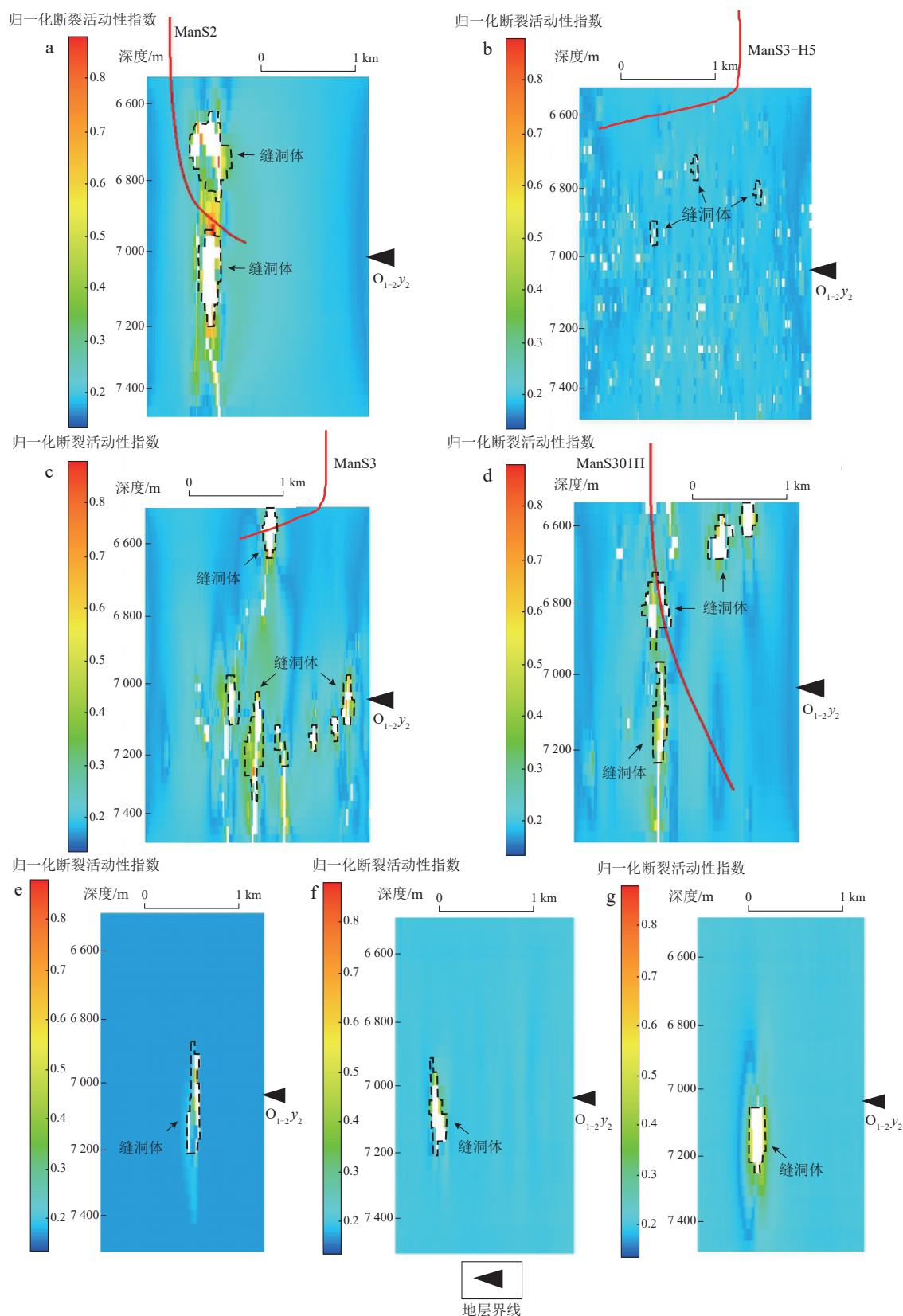


图10 塔里木盆地满深井区断裂带活动性剖面

Fig. 10 Profiles showing the activity of fractured-vuggy rock masses along faults in the Manshen well block, Tarim Basin

a. 过 ManS2 井活动性剖面, ①号断裂带; b. 过 ManS3-H5 井活动性剖面, ②号断裂带; c. 过 ManS3 井活动性剖面, ③号断裂带; d. 过 ManS301H 井活动性剖面, ④号断裂带; e. ⑤号次级断裂带活动性剖面; f. ⑥号次级断裂带活动性剖面; g. ⑦号次级断裂带活动性剖面 (断裂带位置见图 8b。)

3) 测井计算、单井累产数据与应力场数值模拟结果的综合分析表明,缝洞体对岩石强度与应力大小具有显著影响,溶洞附近应力降低幅度最大,约为16 MPa;缝洞体附近应力降低幅度次之,约为12 MPa;而裂缝附近应力降低幅度最小,约为4 MPa。连片分布的缝洞体活动性最高,均一化断裂活动性指数介于0.20~0.25;孤立存在的缝洞体活动性最低,均一化断裂活动性指数维持在0.10左右。不同类型缝洞体的活动性存在差异,其中隆起型缝洞体与下嵌型缝洞体的活动性最强,组合型缝洞体次之,而杂乱型和孤立型缝洞体的活动性最弱。

参 考 文 献

- [1] 黄亚浩,汪如军,文志刚,等. 塔里木盆地富满油田深层—超深层油气成藏过程[J]. 石油学报, 2024, 45(6): 947-960.
HUANG Yahao, WANG Rujun, WEN Zhigang, et al. Hydrocarbon accumulation process of the deep to ultra deep reservoirs in Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(6): 947-960.
- [2] 田军,杨海军,朱永峰,等. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2021, 42(8): 971-985.
TIAN Jun, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8): 971-985.
- [3] 王清华,杨海军,张银涛,等. 塔里木盆地富满油田富东1井奥陶系重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 47-58.
WANG Qinghua, YANG Haijun, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance in the Ordovician in Well Fudong 1 in Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 47-58.
- [4] 杨海军,张辉,尹国庆,等. 基于地质力学的地质工程一体化助推缝洞型碳酸盐岩高效勘探——以塔里木盆地塔北隆起南缘跃满西区块为例[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(2): 27-36.
YANG Haijun, ZHANG Hui, YIN Guoqing, et al. Geomechanics-based geology-engineering integration boosting high-efficiency exploration of fractured-vuggy carbonate reservoirs——A case study on West Yueman Block, northern Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 27-36.
- [5] 蔡振忠,张辉,徐珂,等. 超深层断控碳酸盐岩油藏地质力学建模及其在开发中的应用[J]. 石油实验地质, 2024, 46(4): 868-879.
CAI Zhenzhong, ZHANG Hui, XU Ke, et al. Geomechanics modeling of ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs and its application in development [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(4): 868-879.
- [6] 王来源,黄诚,龚伟,等. 塔中顺北地区志留系断裂特征与应力场扰动分析及井位优选[J]. 石油实验地质, 2024, 46(4): 674-682.
WANG Laiyuan, HUANG Cheng, GONG Wei, et al. Fracture characteristics and stress disturbance analysis for well optimization of Silurian in Shunbei area, central Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(4): 674-682.
- [7] 谢鹏飞,侯加根,汪彦,等. 碳酸盐岩缝洞型储层多元信息融合建模方法在塔河油田十二区奥陶系油藏的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(3): 1-14.
XIE Pengfei, HOU Jiagen, WANG Yan, et al. Application of multi-information fusion modeling of fracture-vuggy reservoir in Ordovician reservoir of 12th block in Tahe Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(3): 1-14.
- [8] 李宗杰,杨子川,李海英,等. 顺北沙漠区超深断溶体油气藏三维地震勘探关键技术[J]. 石油物探, 2020, 59(2): 283-294.
LI Zongjie, YANG Zichuan, LI Haiying, et al. Three-dimensional seismic exploration method for ultra-deep fault-related dissolution reservoirs in the Shunbei desert area [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(2): 283-294.
- [9] 漆立新. 塔里木盆地顺北地区海相超深碳酸盐岩油气勘探物探技术需求与创新应用[J]. 石油物探, 2023, 62(3): 381-394.
QI Lixin. Technical demand and innovative application of geophysical exploration technology for marine ultra-deep carbonate rocks in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2023, 62(3): 381-394.
- [10] 杨学文,汪如军,邓兴梁,等. 超深断控缝洞型碳酸盐岩油藏注水重力驱油理论探索[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 116-124.
YANG Xuewen, WANG Rujun, DENG Xingliang, et al. Theoretical exploration of water injection gravity flooding oil in ultra-deep fault-controlled fractured-cavity carbonate reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 116-124.
- [11] 王清华,徐振平,张荣虎,等. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 15-32.
WANG Qinghua, XU Zhenping, ZHANG Ronghu, et al. New fields, new types of hydrocarbon explorations and their resource potentials in Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 15-32.
- [12] RISPOLI R. Stress fields about strike-slip faults inferred from stylolites and tension gashes [J]. Tectonophysics, 1981, 75(3/4): T29-T36.
- [13] 冯建伟,郭宏辉,汪如军,等. 塔里木盆地塔北地区深层走滑断裂分段性成因机制[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2506-2519.
FENG Jianwei, GUO Honghui, WANG Rujun, et al. Segmentation genesis mechanism of strike-slip fracture of deep carbonate rocks in Tabei area, Tarim Basin [J]. Earth Science,

- 2023, 48(7): 2506–2519.
- [14] HEALY D. Damage patterns, stress rotations and pore fluid pressures in strike-slip fault zones [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B12): B12407.
- [15] ROSHAN H, LI Danqi, CANBULAT I, et al. Borehole deformation based in situ stress estimation using televiewer data [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(9): 2475–2481.
- [16] ZHANG Bohu, HU Xin, YAN Wang, et al. In situ stress inversion and fracture characteristics around local fault in deep heterogeneous strata [J]. *Petroleum Science and Technology*, 2024, 42(4): 448–469.
- [17] LIU Jingshou, LU Yuanhong, XU Ke, et al. Main controlling factors and prediction model of fracture scale in tight sandstone: Insights from dynamic reservoir data and geomechanical model analysis [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57(10): 8343–8362.
- [18] 徐珂, 刘敬寿, 张辉, 等. 复杂构造区全层系地质力学建模及其地质与工程应用 [J]. *地学前缘*, 2024, 31(5): 195–208.
- XU Ke, LIU Jingshou, ZHANG Hui, et al. Geological and engineering applications of full-stratum geomechanical modeling in complex structural areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(5): 195–208.
- [19] 刘敬寿, 丁文龙, 杨海盟, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区天然裂缝与岩石力学层演化: 基于数值模拟的定量分析 [J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2572–2588.
- LIU Jingshou, DING Wenlong, YANG Haimeng, et al. Natural fractures and rock mechanical stratigraphy evaluation in Huaqing area, Ordos Basin: A quantitative analysis based on numerical simulation [J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 2572–2588.
- [20] LIU Jingshou, YANG Haimeng, XU Ke, et al. Genetic mechanism of transfer zones in rift basins: Insights from geomechanical models [J]. *GSA Bulletin*, 2022, 134(9/10): 2436–2452.
- [21] 李越, 牟建业, 张士诚, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩储层裂缝扩展规律数值模拟 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(6): 135–142.
- LI Yue, MOU Jianye, ZHANG Shicheng, et al. Numerical simulation of fracture propagation in Tahe fracture-vuggy carbonate reservoirs [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2022, 46(6): 135–142.
- [22] 徐珂, 杨海军, 张辉, 等. 基于地质力学方法的深层致密气藏高效勘探技术: 以库车坳陷迪北气藏为例 [J]. *地球科学*, 2023, 48(2): 621–639.
- XU Ke, YANG Haijun, ZHANG Hui, et al. Efficient exploration technology of deep tight gas reservoir based on geomechanics method: A case study of Dibe gas reservoir in Kuqa Depression [J]. *Earth Science*, 2023, 48(2): 621–639.
- [23] 吕心瑞, 孙建芳, 李红凯, 等. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏精细地质建模技术 [J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1195–1210.
- LYU Xinrui, SUN Jianfang, LI Hongkai, et al. Fine geological modelling technology for deep fractured-vuggy carbonate oil reservoirs in the Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1195–1210.
- [24] 何治亮, 赵向原, 张文彪, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层精细地质建模技术进展与攻关方向 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 16–33.
- HE Zhiliang, ZHAO Xiangyuan, ZHANG Wenbiao, et al. Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 16–33.
- [25] 吕心瑞, 孙建芳, 郭兴威, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏储层结构表征方法——以塔里木盆地塔河 S67 单元奥陶系油藏为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 728–737.
- LYU Xinrui, SUN Jianfang, WU Xingwei, et al. Internal architecture characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on the Ordovician reservoirs, Tahe Unit S67, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 728–737.
- [26] ZHU Zijia, KANG Zhihong, KANG Zhijiang. Influence of tectonic stress field on oil and gas migration in the Tahe Oilfield carbonate reservoir: Identification of areas favorable for reservoir formation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, 180: 105829.
- [27] RONG Hai, LI Nannan, CAO Chen, et al. Numerical simulation of blasting behavior of rock mass with cavity under high in-situ stress [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 16046.
- [28] 张文彪, 段太忠, 赵华伟, 等. 断控岩溶体系空间结构差异性与三维建模——以顺北 1 号断裂带为例 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(28): 12094–12108.
- ZHANG Wenbiao, DUAN Taizhong, ZHAO Huawei, et al. Hierarchical characteristics and 3 D modeling of fault-controlled paleokarst systems: A case study of shunbei1 strike-slip fault zone [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(28): 12094–12108.
- [29] 段太忠, 张文彪, 何治亮, 等. 塔里木盆地顺北油田超深断溶体深度学习地质建模方法 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 203–212.
- DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, HE Zhiliang, et al. Deep learning-based geological modeling of ultra-deep fault-karst reservoirs in Shunbei Oilfield, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 203–212.
- [30] 李永强, 侯加根, 刘钰铭, 等. 基于岩溶模式的溶洞储集体三维地质建模 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(5): 43–50.
- LI Yongqiang, HOU Jiagen, LIU Yuming, et al. 3D modeling of cave reservoirs based on karst patterns [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(5): 43–50.
- [31] 张煜, 李海英, 陈修平, 等. 塔里木盆地顺北地区超深断控缝洞型油气藏地质-工程一体化实践与成效 [J]. *石油与天然气*

- 地质, 2022, 43(6): 1466–1480.
- ZHANG Yu, LI Haiying, CHEN Xiuping, et al. Practice and effect of geology-engineering integration in the development of ultra-deep fault-controlled fractured-vuggy oil/gas reservoirs, Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1466–1480.
- [32] 杨德彬, 鲁新便, 鲍典, 等. 塔里木盆地北部奥陶系海相碳酸盐岩断溶体油藏成因类型及特征再认识[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 357–366.
- YANG Debin, LU Xinbian, BAO Dian, et al. New insights into the genetic types and characteristics of the Ordovician marine fault-karst carbonate reservoirs in the northern Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 357–366.
- [33] 云露, 朱秀香. 一种新型圈闭: 断控缝洞型圈闭[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 34–42.
- YUN Lu, ZHU Xiuxiang. A new trap type: Fault-controlled fracture-vuggy trap [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 34–42.
- [34] 刘雨晴, 邓尚, 李海英, 等. 深层碳酸盐岩低序级断裂体系发育特征及勘探启示: 以塔里木盆地顺北油气田为例[J]. 地球科学, 2025, 50(6): 2239–2254.
- LIU Yuqing, DENG Shang, LI Haiying, et al. Development characteristics and exploration implications of low-order fault systems in Tarim Basin: An example from Shunbei oil and gas field [J]. Earth Science, 2025, 50(6): 2239–2254.
- [35] 乔俊程, 常少英, 曾溅辉, 等. 塔里木盆地北部富满地区超深层走滑断裂带碳酸盐岩油气差异成藏成因探讨[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1226–1246.
- QIAO Juncheng, CHANG Shaoying, ZENG Jianhui, et al. Origin of differential hydrocarbon accumulation in ultra-deep carbonate reservoirs along strike-slip fault zones in the Fuman area, northern Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1226–1246.
- [36] 宋兴国, 陈石, 杨明慧, 等. 塔里木盆地富满油田 F I 16 断裂发育特征及其对油气分布的影响[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(3): 99–109.
- SONG Xingguo, CHEN Shi, YANG Minghui, et al. Development characteristics of F I 16 fault in Fuman oilfield of Tarim Basin and its influence on oil and gas distribution [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(3): 99–109.
- [37] 宋兴国, 陈石, 谢舟, 等. 塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 335–349.
- SONG Xingguo, CHEN Shi, XIE Zhou, et al. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 335–349.
- [38] 薛一帆, 文志刚, 黄亚浩, 等. 深层—超深层走滑断裂带储层流体来源与油气成藏过程研究——以塔里木盆地富满油田为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 549–559.
- XUE Yifan, WEN Zhigang, HUANG Yahao, et al. Study on reservoir fluid source and hydrocarbon accumulation process in deep to ultra-deep strike-slip fault zone: A case study of Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 549–559.
- [39] 蔡振忠, 赵海涛, 王彭, 等. 考虑流固耦合作用的超深缝洞型碳酸盐岩储层连通性表征: 以塔里木盆地富满油田满深区块为例[J]. 地学前缘, 2024, 31(5): 301–312.
- CAI Zhenzhong, ZHAO Haitao, WANG Peng, et al. Characterization of connectivity in ultra-deep fractured-caveate reservoirs considering fluid-solid coupling: A case study of the Manfen Block in the fuman oil field of the Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(5): 301–312.
- [40] 邓尚, 邱华标, 刘大卫, 等. 克拉通内走滑断裂成因与控藏机制研究进展——以塔里木盆地北部为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1211–1225.
- DENG Shang, QIU Huabiao, LIU Dawei, et al. Advances in research on the genetic mechanisms of intracratonic strike-slip fault system and their control on hydrocarbon accumulation: A case study of the northern Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1211–1225.
- [41] 吴高奎, 张忠民, 林畅松, 等. 塔里木盆地塔北隆起区中生界沉积演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 845–858.
- WU Gaokui, ZHANG Zhongmin, LIN Changsong, et al. Evolution of Mesozoic sedimentary fill in the Tabei uplift region, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 845–858.
- [42] 云露, 曹自成, 唐大卿, 等. 塔西南地区和和田河走滑断裂带分段差异活动特征及控储效应[J]. 石油学报, 2025, 46(5): 875–890.
- YUN Lu, CAO Zicheng, TANG Daqing, et al. Segmented differential activity of Hetianhe strike-slip fault zone and its reservoir-controlling effect in southwest Tarim Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2025, 46(5): 875–890.
- [43] 朱光有, 姜华, 黄士鹏, 等. 中国海相油气成藏理论新进展与万米深层超大型油气区预测[J]. 石油学报, 2025, 46(4): 816–842.
- ZHU Guangyou, JIANG Hua, HUANG Shipeng, et al. New progress of marine hydrocarbon accumulation theory and prediction of super large oil and gas areas in deep strata buried at a depth of about 10000 meters in China [J]. Acta Petroli Sinica, 2025, 46(4): 816–842.
- [44] 陈利新, 贾承造, 邬光辉, 等. 塔里木新元古代裂谷盆地基底结构与演化[J]. 地球科学, 2024, 49(10): 3445–3458.
- CHEN Lixin, JIA Chengzao, WU Guanghui, et al. Basement architecture and evolution of neoproterozoic Tarim rift basin [J]. Earth Science, 2024, 49(10): 3445–3458.
- [45] 李萌, 汤良杰, 漆立新, 等. 塔北隆起南坡差异构造演化及其对油气成藏的控制[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 218–228.
- LI Meng, TANG Liangjie, QI Lixin, et al. Differential tectonic evolution and its controlling on hydrocarbon accumulation in the south slope of Tabei uplift [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26

- (2): 218-228.
- [46] 安海亭, 李海银, 王建忠, 等. 塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 142-147.
- AN Haiting, LI Haiyin, WANG Jianzhong, et al. Tectonic evolution and its controlling on oil and gas accumulation in the northern Tarim Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 142-147.
- [47] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂断控大油气田的勘探发现与技术创新[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 58-71.
- WANG Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(4): 58-71.
- [48] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 1-17.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 1-17.
- [49] 黄诚, 云露, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统“断控”缝洞系统划分与形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 54-68.
- HUANG Cheng, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Division and formation mechanism of fault-controlled fracture-vug system of the Middle-to-Lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 54-68.
- [50] 计秉玉, 郑松青, 顾浩. 缝洞型碳酸盐岩油藏开发技术的认识与思考——以塔河油田和顺北油气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1459-1465.
- JI Bingyu, ZHENG Songqing, GU Hao. On the development technology of fractured-vuggy carbonate reservoirs: A case study on Tahe Oilfield and Shunbei oil and gas field[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1459-1465.
- [51] 张滨鑫, 张冠杰, 刘敬寿, 等. 碳酸盐岩缝洞型储层识别与雕刻方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2024, 39(2): 580-593.
- ZHANG Binxin, ZHANG Guanjie, LIU Jingshou, et al. Research progress on identification and carving methods of carbonate fracture-cavity reservoirs[J]. *Progress in Geophysics*, 2024, 39(2): 580-593.
- [52] LIU Jingshou, LU Yuanhong, LUO Yang, et al. Method for predicting the injection pressure for horizontal wells in fractured tight sandstone reservoirs[J]. *Geophysics*, 2024, 89(4): B273-B287.
- [53] 徐珂, 杨海军, 张辉, 等. 塔里木盆地克拉苏构造带超深层致密砂岩气藏一体化增产关键技术与实践[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(5): 106-115.
- XU Ke, YANG Haijun, ZHANG Hui, et al. Key technology and practice of the integrated well stimulation of ultra-deep tight sandstone gas reservoir in Kelasu structural belt, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(5): 106-115.
- [54] 江同文, 张辉, 徐珂, 等. 超深层裂缝型储层最佳井眼轨迹量化优选技术与实践——以克拉苏构造带博孜A气藏为例[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 149-161.
- JIANG Tongwen, ZHANG Hui, XU Ke, et al. Technology and practice of quantitative optimization of borehole trajectory in ultra-deep fractured reservoir: A case study of Bozi A gas reservoir in Kelasu structural belt, Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(4): 149-161.
- [55] 李凤磊, 林承焰, 任丽华, 等. 基于地质成因的走滑断裂带岩溶缝洞型储层连通性与剩余油分布模式[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 315-334.
- LI Fenglei, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Connectivity and residual oil distribution patterns of fractured-vuggy karst reservoirs in strike-slip fault zone: A case study of the Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(1): 315-334.

(编辑 董奕含)