

基于有限元应变能量信息致密砂岩储层裂缝甜点预测

王子文^{1*}, 尹 帅^{2#}

¹中国地质大学能源学院, 北京

²西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年4月19日; 录用日期: 2022年5月2日; 发布日期: 2022年5月9日

摘 要

本文利用有限元法构建了致密砂岩储层的甜点预测方法。应变能量(U)能定量表征不同类型岩石介质内部微尺度破裂发生的概率。其具体步骤为: 首先, 建立低幅度构造区地质模型, 以相控原则对岩石力学参数进行了赋值, 通过边界施加载荷恢复了目的层在燕山期的古构造应力场; 然后, 根据能量守恒原理求取目的层的应变能量密度分布。 U 值的平面分布具有明显呈带状分布的特征。分析了应变能量密度与低幅构造区强非均质性致密砂岩储层产能之间的关系, 符合率较高。高应变能量区为甜点区。本文基于 U 值定义的甜点主要是从岩体变形及破裂角度进行的分析。在实际勘探过程中, 还应考虑储层物性及保存条件等地质因素。本文建立了一套系统的基于 U 值计算的甜点预测方法。该方法适用于鄂尔多斯盆地低幅构造区强非均质性致密砂岩储层。

关键词

致密砂岩储层, 有限元, 应变能量, 产能, 鄂尔多斯盆地

Fracture Sweet Spot Prediction of Tight Sandstone Reservoirs Based on Finite Element Strain Energy Information

Ziwen Wang^{1*}, Shuai Yin^{2#}

¹School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing

²School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi

Received: Apr. 19th, 2022; accepted: May 2nd, 2022; published: May 9th, 2022

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王子文, 尹帅. 基于有限元应变能量信息致密砂岩储层裂缝甜点预测[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(5): 573-581. DOI: 10.12677/ag.2022.125058

Abstract

In this paper, the finite element method is used to construct a sweet spot prediction method for tight sandstone reservoirs. Strain energy (U) can quantitatively characterize the probability of micro-scale fractures in different types of rock media. The specific steps are: first, establish a geological model of the low-amplitude structural zone, assign values to the rock mechanics parameters based on the phase control principle, and restore the paleo-tectonic stress field of the target layer in the Yanshanian period through the boundary load. Then, according to the principle of energy conservation, the strain energy density distribution of the target layer is obtained. The plane distribution of U value has obvious characteristics of band-like distribution. The relationship between strain energy density and productivity of tight sandstone reservoirs with strong heterogeneity in low-amplitude structural areas is analyzed, with a high coincidence rate. The high strain energy zone is the sweet spot. In this paper, the sweet spot defined by the U value is mainly analyzed from the perspective of rock deformation and fracture. In the actual exploration process, geological factors such as reservoir physical properties and preservation conditions should also be considered. This paper establishes a systematic dessert prediction method based on U value calculation. This method is suitable for tight sandstone reservoirs with strong heterogeneity in the low-amplitude structural area of the Ordos Basin.

Keywords

Tight Sandstone Reservoir, Finite Element, Strain Energy, Productivity, Ordos Basin

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

鄂尔多斯盆地在大地构造上位于华北板块的西部,是古生代、中生代多期沉积盆地改造形成的多旋回叠合型盆地[1] [2] [3] [4]。鄂尔多斯盆地是我国重要的能源生产基地,其上古生界天然气资源主要来自煤系地层,多属致密砂岩气藏的范畴[3] [4] [5] [6] [7]。二叠系盒8段是上古生界沉积系统的重要产层,该套储层具有大面积含气,但含气程度具有巨大差异的特征。该套储层的单井日产气量通常低于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于典型的低效储层。为了探讨盒8储层的天然气富集规律,前人针对该套储层的储层特征、成岩作用及沉积相等方面进行了大量研究[8] [9] [10] [11] [12]。该储层中天然气富集特征主要受微观孔隙结构的影响。盒8储层的孔隙类型主要包括残余原生粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、晶间孔及微裂缝。研究发现,这些微裂缝包括粒间微缝、穿粒微缝及不同方向微缝相互嵌合的网状微缝[13] [14] [15] [16]。微裂缝的大量存在,有效的沟通了不同类型孔隙的联通性,是致密砂岩储层甜点形成的重要因素[17] [18] [19] [20]。

微裂缝代表最低级别的破裂级序。目前,有关微裂缝的平面分布预测方法还非常局限,已有的研究主要集中在实验测试方面。岩石的破裂特征受控于岩石力学性质及应力环境。因此,通过关键构造期古构造应力场恢复,结合一定破裂准则,可实现微尺度破裂区的有效预测。应变能量密度(U)能定量表征不同类型岩石介质内部应变能量的分布,当该能量超过岩石颗粒的强度极限时,岩石即发生微尺度破裂。因此,本文利用该方法对低幅构造区低效致密砂岩储层的应变能量密度进行了计算。同时,探讨了应变能量密度与单井产能之间的关系,并对低效致密砂岩储层甜点进行了预测。

2. 地质背景及储层

鄂尔多斯盆地的构造单元可划分为天环凹陷、晋西挠褶带、渭北隆起、伊盟隆起、伊陕斜坡、及西缘逆冲构造带(图 1)。本文的研究区位于鄂尔多斯盆地北部。研究区地层平缓, 构造变形程度较低, 主要发育一些低幅构造。研究区区域构造为一宽缓的、向西倾的、区域性大单斜。在宽缓的斜坡上分布有低缓的鼻状构造, 研究区内无断裂, 表明构造活动较弱。

研究区的主力产气层位于二叠系的盒 8 段, 深度约为 3400~3800 m, 厚度约为 30~60 m。盒 8 段主要为碎屑岩沉积的砂泥岩地层, 为辫状河沉积。砂岩储层岩性具有粒度粗、变化大的特征, 主要包括岩屑石英砂岩及石英砂岩。该储层具有低孔、低渗特征, 其孔隙度分布在 5%~12%, 渗透率分布在 $0.01\sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 为典型的低孔、低渗致密砂岩储层。

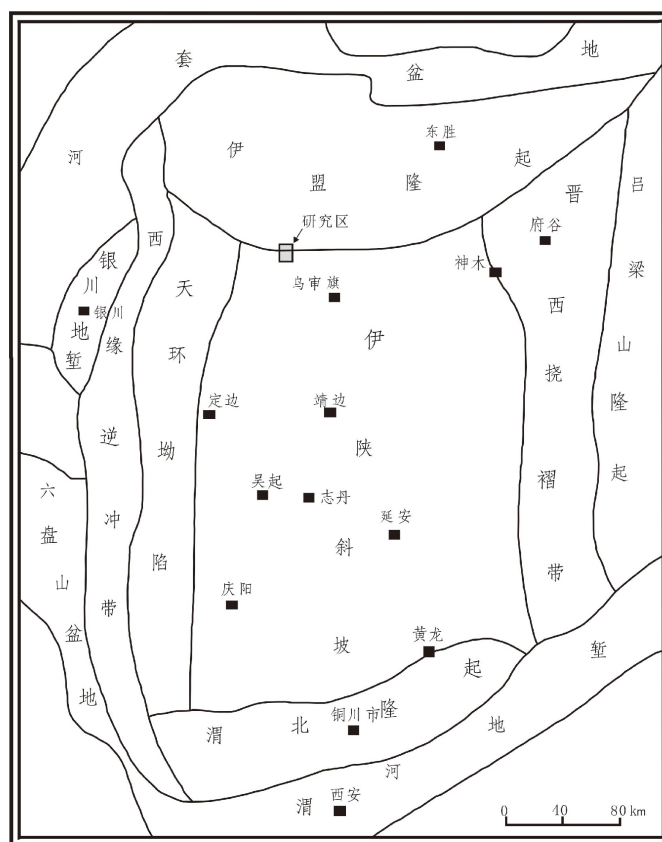
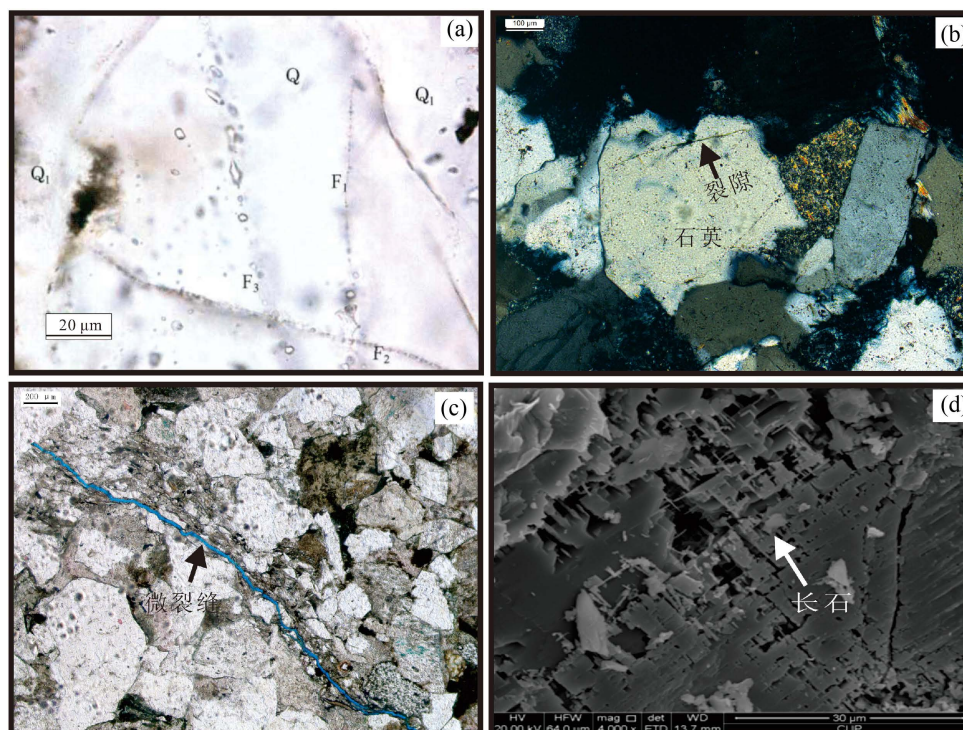


Figure 1. Location of the study area

图 1. 研究区位置图

盒 8 段致密砂岩中微裂缝较为发育, 图 2 所示为盒 8 段致密砂岩储层微裂缝及包裹体荧光特征。均一温度结果表明这些微裂缝形成于燕山期, 微裂缝通常分布在颗粒内部或切穿颗粒, 其主要受能量大小的影响。包裹体沿着微裂缝呈串珠状分布。微裂缝与烃类的运移及储层的形成具有直接联系。

该地区上古生界砂岩的压实性很强, 颗粒之间呈凹凸接触和线、凹凸接触, 其次是点、线接触(图 2)。同时, 石盒子组砂岩胶结作用强, 主要表现为石英次生加大。虽然石英的胶结作用降低了岩石的孔隙度, 但它抵消了部分岩石压实, 从而保持了渗透性。微裂缝的增孔作用有限, 但可以改善储层连通性并为流体运移提供有效通道。



备注: (a) W1 井, 微裂隙及包裹体 Q——石英颗粒; Q₁——自生石英加大边; F₁, F₂ 及 F₃——石英颗粒表面微裂隙, F₁ 未切穿石英颗粒, F₂ 及 F₃ 切穿石英颗粒及加大边。F₁ 中串珠状包裹体基本不发光, 为早期不含烃盐水包裹体。F₂、F₃ 中包裹体为第 2 期含烃盐水包裹体, 其气相及液相部分均可见明显发光现象; (b) 1588.88 m, SM-22 井, 粗长石岩屑砂岩, 微裂隙; (c) 1676.16 m, SM-9 井, 中-粗岩屑砂岩, 微裂隙切穿多个颗粒; (d) 1572.77 m, G2 井, 长石岩屑砂岩, 骨架状长石及溶蚀孔缝

Figure 2. Fluorescence characteristics of microfractures and inclusions in tight sandstone reservoirs of the He 8 Member in the study area

图 2. 研究区盒 8 段致密砂岩储层微裂隙及包裹体荧光特征

3. 古应力场恢复

应变能量密度的计算建立在构造应力场恢复的基础上。因此, 本文首先利用有限元法对目的层的古构造应力场进行了恢复。所采用软件为 ANSYS, 其是多耦合应力场分析的商业应用软件, 前置静态模块可以进行复杂地质体网格划分及应力及应变的扩展耦合分析。该软件适用于非线性致密砂岩应力场模拟及裂缝预测, 且能够模拟不同地质力学属性岩体的应变能量分布。3D 有限元方法是一种常用的构造应力场模拟方法, 通过对力学单元进行赋值并对边界进行约束, 从而获得应力的平面分布。

3.1. 单元划分

利用 ANSYS 软件进行有限元分析。首先, 建立了盒 8 段目的层的有限元模型, 见图 3。在低幅构造区, 对网格进行了加密。网格加密一方面增加了计算量, 但同时提高了平面分辨率, 该网格精度为 50 m。

3.2. 单元赋值

盒 8 段砂体的沉积相是根据砂地比(SMR)进行划分的。利用相控原则进行岩石力学参数的赋值可以保证构造应力场模拟结果的可靠性。SMR 与杨氏模量(E)间有非常好的正相关性; 而 SMR 与泊松比(ν)之间具有非常好的负相关性。据此, 根据 SMR 对目的层的杨氏模量及泊松比进行赋值(公式 1 及公式 2)。

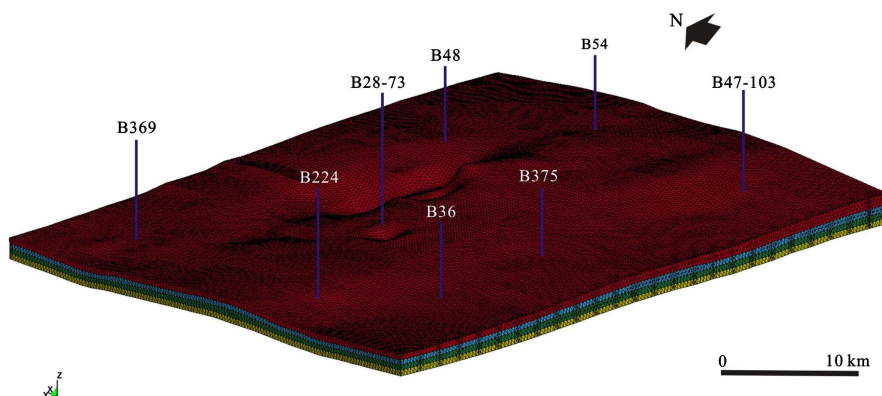


Figure 3. The finite element model of the target layer in the study area

图 3. 研究区目的层的有限元模型图

杨氏模量高值区对应泊松比低值区，目的层的杨氏模量主要分布在 23~35 GPa 之间，泊松比主要分布在 0.23~0.27 之间。

$$E = 0.158 \cdot \text{SMR} + 21.37 \quad (1)$$

$$\nu = -0.0005 \cdot \text{SMR} + 0.275 \quad (2)$$

式中，SMR 为砂地比； E 为杨氏模量，GPa； ν 为泊松比。

3.3. 应力加载

研究区盒 8 段裂缝主要形成于燕山期主幕最强一期的挤压应力环境下。在该时期，水平最大主应力大小约为 100 MPa，方向为 N45°W 向；同时，水平最大主应力与水平最小主应力的比值分布在 1.6 到 1.7 之间。因此，本文的应力初始条件加载方案如图 4 所示，分别在 N45°W 及 N45°E 方向施加 100 MPa 及 60 MPa 的挤压应力。东南及西南两侧固定，另外两侧施加边界应力。水平最大主应力与水平最小主应力之间的比值为 1.67。垂向应力通过施加重力加速度实现。目的层的初始岩石力学性质为：杨氏模量 28 GPa，泊松比 0.24。

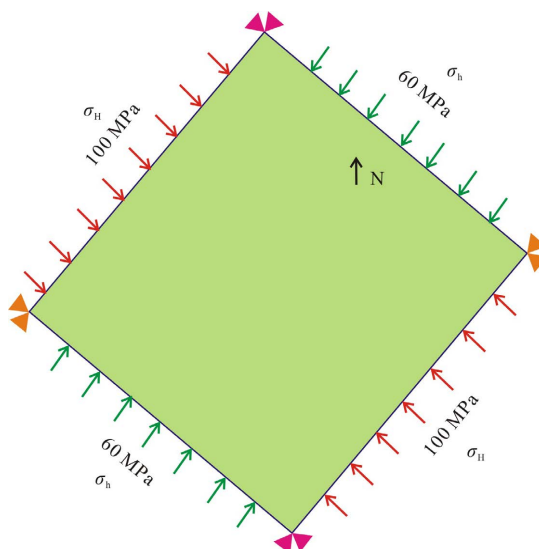
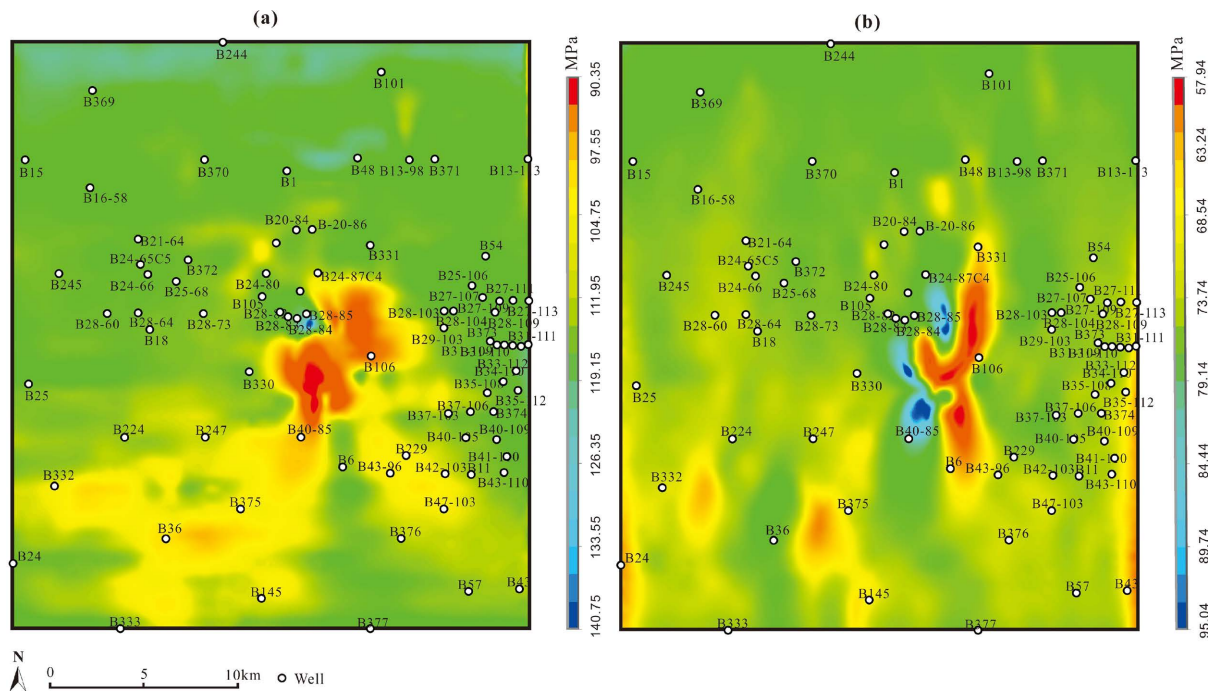


Figure 4. Stress loading scheme of the target layer

图 4. 目的层的应力加载方案图

3.4. 古构造应力场分布

盒 8 段主产层的水平最大主应力及水平最小主应力的平面分布如图 5 所示。根据各个主应力的平面分布特征可以看出, 应力在平面上呈带状分布。水平最大应力主要分布在 90~125 MPa; 水平最小应力主要分布在 60~90 MPa, 部分区域变化较小。水平方向应力的分布主要受岩性、局部构造及埋深的影响。部分区域受岩性突变或复杂构造的影响, 会发生应力的强烈变化。



备注: a 为最大主应力, b 为最小主应力。

Figure 5. Horizontal maximum and minimum principal stress distribution of the target layer in the study area

图 5. 研究区目的层的水平最大和最小主应力分布图

4. 应变能量及甜点预测分析

4.1. 应变能量分布

应变能量(U)可以表征岩石内部应变的分布。微裂缝的存在会显著影响岩石内部应变能的分布。应变能量密度高值区岩石容易发生微型破裂, 因此, 该参数可以用于判定岩石内部破裂出现的概率。对于变形岩体, 存储于岩石中的应变能基本上等同于弹性能。因此, 根据能量守恒原理, 外力作用在岩体上使其发生变形所做的功等于岩体的应变能。最终, 该参数可以通过各主应力及岩石力学参数表征, 其计算方程如下所示:

$$U = \frac{1}{2E} [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (3)$$

式中 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 为三个主应力, MPa; E 为杨氏模量, GPa; ν 为泊松比。

基于古构造应力场恢复结果及岩石力学参数的分布, 利用公式(1)求取了目的层的应变能量的平面分布, 结果见图 6。

U 值的平面分布具有明显呈带状分布的特征, U 值主要分布在 0.12~0.30 J·m⁻³ 之间。具有较高 U 值

的区域主要分布在研究区的中部及东部地区, 其 U 值通常大于 $0.24 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 6)。这些区域的地层岩石中聚集了大量的应变能量, 易于发生应力集中并发生破裂。

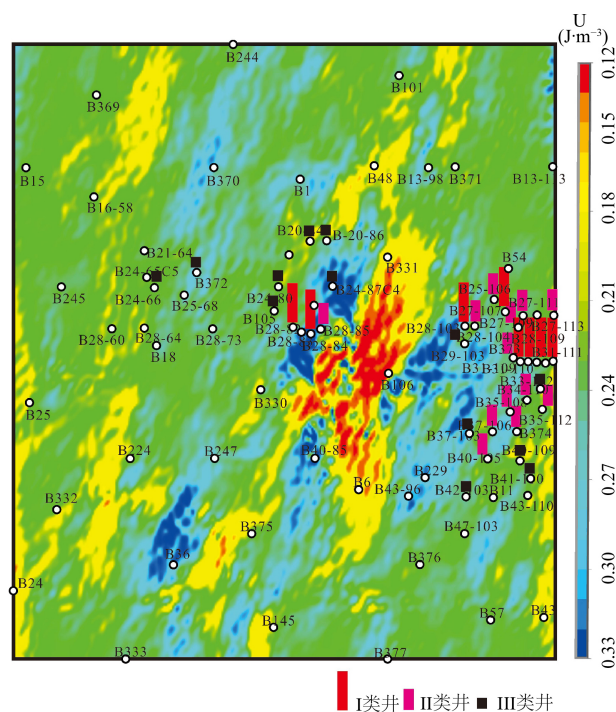


Figure 6. The strain capacity distribution of the target layer
图 6. 目的层的应变能力分布图

4.2. 甜点预测分析

在求取各层段应变能量基础上, 对比了应变能量分布与生产井的产能之间的关系。生产井被划分为 3 类, I 类, II 类及 III 类。I 类井的单井平均日产气量通常远远低于 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其累积产量通常低于 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该类气井不能获得商业开发, 同时, 钻遇该类气井会造成严重的资金浪费。从整个研究区盒 8 段气藏的开发来看, 该类气井的数量非常大, 几乎达到了 50%。II 类井的单井平均日产气量介于 $0.5 \sim 1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 之间, 其累积产量通常介于 $1000 \sim 3000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 之间。III 类井的单井平均日产气量大于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其累积产量通常大于 $3000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。II 类和 III 类井均具有较好的商业开发价值。

目前, 研究区的开发井主要位于中部及东部区域, 其它地方主要为勘探井(图 6)。I 类井和 II 类井主要分布在东部区域; 而 III 类井的分布比较零散。整体来看, I 类井和 II 类井主要分布在高 U 值区, 而 III 类井分布区域的 U 值较低。

从图 6 可以看出, 商业气井主要分布在甜点区域内, 而 III 类气井基本都分布在甜点区域外部。基于 U 值定义的该甜点主要是从岩体变形及破裂角度进行的分析。这些区域相对更容易富集天然气。但是, 影响致密砂岩储层含气性的因素还包括储层物性、及保存条件等。因此, 在致密砂岩储层甜点预测中, 应综合考虑各类地质因素及本文基于 U 值计算的甜点预测结果。本文构建了一套系统的基于 U 值计算的甜点预测方法。该方法适用于鄂尔多斯盆地低幅构造区强非均质性致密砂岩储层。

5. 结论

- 1) 本文系统构建了一套基于有限元法的应变能量密度构建方法。首先, 建立低幅度构造区地质模型,

以相控原则对岩石力学参数进行了赋值, 通过边界施加荷载恢复了目的层在燕山期的古构造应力场; 然后, 根据能量守恒原理求取目的层的应变能量密度分布。

2) 目的层的水平最大应力主要分布在 90~125 MPa; 水平最小应力主要分布在 60~90 MPa; 垂向应力主要分布在 60~64 MPa, 其变化较小。水平方向应力的分布主要受岩性及局部构造的影响; 而垂向应力主要受埋深的影响。部分区域受岩性突变或复杂构造的影响, 会发生应力的强烈变化。

3) U 值的平面分布具有明显呈带状分布的特征, U 值主要分布在 0.12~0.30 J·m⁻³ 之间。具有较高 U 值的区域主要分布在研究区的中部及东部地区。应变能量与低幅构造区强非均质性致密砂岩储层产能之间有良好的相关性。

基金项目

国家自然科学基金项目(41372139)。

参考文献

- [1] 李书恒, 方国庆, 杨金龙, 廖建波, 樊建明. 鄂尔多斯盆地超低渗透储层成因研究及意义[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(6): 32-37.
- [2] Shuai, Y., Zhang, S., Mi, J., Gong, S., Yuan, X., Yang, Z., Liu, J. and Cai, D. (2013) Charging Time of Tight Gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin, Central China. *Organic Geochemistry*, **64**, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2013.09.001>
- [3] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1-11.
- [4] Zhao, J.L., Tang, D.Z., Qin, Y., Xu, H., Lyu, Y.M., Tao, S. and Li, S. (2017) Evaluation of Fracture System for Coal Macrolithotypes in the Hancheng Block, Eastern Margin of the Ordos Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **159**, 799-809. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.031>
- [5] Ridd, M.F. and Watkinson, I. (2013) The Phuket-Slate Belt Terrane: Tectonic Evolution and Strike-Slip Emplacement of a Major Terrane on the Sundaland Margin of Thailand and Myanmar. *Proceedings of the Geologist's Association*, **124**, 994-1010. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2013.01.007>
- [6] Morley, C.K. (2013) Discussion of Tectonic Models for Cenozoic Strike-Slip Fault-Affected Continental Margins of Mainland SE Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, **76**, 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.10.019>
- [7] Nickelsen, R.P. (2009) Overprinted Strike-Slip Deformation in the Southern Valley and Ridge in Pennsylvania. *Journal of Structural Geology*, **31**, 865-873. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.02.001>
- [8] Nenna, F. and Aydin, A. (2011) The Role of Pressure Solution Seam and Joint Assemblages in the Formation of Strike-Slip and Thrust Faults in a Compressive Tectonic Setting; The Variscan of South-Western Ireland. *Journal of Structural Geology*, **33**, 1595-1610. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2011.09.003>
- [9] Su, X.B., Lin, X.Y., Zhao, M.J., Song, Y. and Liu, S. (2005) The Upper Paleozoic Coalbed Methane System in the Qinshui Basin, China. *AAPG Bulletin*, **89**, 81-100. <https://doi.org/10.1306/07300403125>
- [10] 梁建设, 王存武, 柳迎红, 高印军, 杜江峰, 冯汝勇, 等. 沁水盆地致密气成藏条件与勘探潜力研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 25(10): 1509-1519.
- [11] Shao, L.Y., Yang, Z.Y., Shang, X.X., Xiao, Z.-H., Wang, S., Zhang, W.-L., et al. (2015) Lithofacies Palaeogeography of the Carboniferous and Permian in the Qinshui Basin, Shanxi Province, China. *Journal of Palaeogeography*, **4**, 384-412. <https://doi.org/10.1016/j.jop.2015.06.001>
- [12] Nelson, E.J., Meyer, J.J. and Hillis, R.R. (2005) Transverse Drilling-Induced Tensile Fractures in the West Tuna Area, Gippsland Basin, Australia: Implications for the *in Situ* Stress Regime. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **42**, 361-371. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.12.001>
- [13] Nelson, R.A. (1985) Geological Analysis of Naturally Fractured Reservoirs. Gulf Publishing Company, Houston, 8-26.
- [14] 李月, 林玉祥, 于腾飞. 沁水盆地构造演化及其对游离气藏的控制作用[J]. 桂林理工大学学报, 2011, 31(4): 481-487.
- [15] 王兆清. 多边形有限元研究进展[J]. 力学进展, 2006, 36(3): 344-353.
- [16] 李邵军, 冯夏庭, 王威, 周辉. 岩土工程中基于栅格的三维地层建模及空间分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 532-537.

-
- [17] Camac, B.A. and Hunt, S.P. (2009) Predicting the Regional Distribution of Fracture Networks Using the Distinct Element Numerical Method. *AAPG Bulletin*, **93**, 1571-1583. <https://doi.org/10.1306/07230909040>
- [18] 王珂, 张惠良, 张荣虎, 王俊鹏, 戴俊生, 杨学君. 超深层致密砂岩储层构造裂缝特征及影响因素[J]. 石油学报, 2016, 37(6): 715-727+742.
- [19] Kattenhorn, S.A., Aydin, A. and Pollard, D.D. (2000) Joints at High Angles to Normal Fault Strike: An Explanation Using 3-D Numerical Models of Fault Perturbed Stress Fields. *Journal of Structural Geology*, **22**, 1-23. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00130-3](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00130-3)
- [20] Pei, Y.W., Paton, D.A., Knipe, R.J. and Wu, K. (2015) A Review of Fault Sealing Behavior and Its Evaluation in Siliclastic Rocks. *Earth-Science Reviews*, **150**, 121-138. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.011>