

文章编号:1001-1986(2001)05-0007-04

油气储层有限变形转动场及其裂缝发育区预测

——以塔里木盆地大庆区块下古生界碳酸盐岩为例

孟召平, 彭苏萍, 曹代勇, 张守仁 (中国矿业大学, 北京 100083)

摘要:应用有限变形力学理论, 建立了油气储层变形位移函数, 给出了一种新的恢复储层变形初始位形的方法, 实现了储层构造变形应变—转动分离, 并以平均整旋角(θ)的梯度作为基本特征量, 研究了塔里木盆地大庆区块碳酸盐岩储层有限变形转动场分布; 依据局部转动和介质非协调转动产生断裂的思想, 对碳酸盐岩储层裂缝发育区进行预测, 取得了令人满意的结果。

关键词:油气储层; 有限变形; 转动场; 裂缝预测

中图分类号:P628 文献标识码:A

1 引言

塔里木盆地大庆区块, 地理为东经 $80^{\circ}10' \sim 82^{\circ}00'$, 北纬 $39^{\circ}00' \sim 40^{\circ}40'$, 面积达 29042 km^2 , 主体位于阿瓦提凹陷和巴楚断隆两个二级构造单元, 细分为五个三级构造单元。(图1)经历了前震旦纪(A_nZ)结晶基底形成、震旦—奥陶纪(Z—O)克拉通边缘坳拉槽沉积、志留纪(S)稳定克拉通坳陷沉积、泥盆纪—早二叠世(D—P₁)克拉通内裂谷盆地沉积、晚二叠—老第三纪(P₂—E)内陆坳陷盆地沉积

和新第三纪—第四纪(N—Q)的前陆盆地沉积。其中, 下古生界的寒武—奥陶系主要是一套滨浅海相碳酸盐台地沉积, 厚度巨大, 达 $1000 \sim 5000 \text{ m}$, 代表坳拉槽发育晚期强烈坳陷阶段的产物, 其碳酸盐岩储集层是区块乃至整个塔里木盆地的主要勘探目的层^[1]。由于碳酸盐岩储层物性在空间上分布的非均质性, 预测难度大, 所以认识和评价碳酸盐岩在空间分布特征和预测碳酸盐储层裂缝发育有利区, 将是油气勘探成败的关键。

世界各国都重视在勘探各阶段预测储层裂缝发

收稿日期:2001-02-06

基金项目:国家杰出青年基金项目(编号50025413)和国家自然科学基金资助项目(编号59774003和49872053)

作者简介:孟召平(1963-),男,湖南汨罗人,中国矿业大学博士,副教授,从事油气地质及地下工程地质研究。

a. 开封凹陷区地温梯度在 $2.66 \sim 3.84^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ 之间, 平均值约为 $3.41^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ 。

b. 地表热流值在 $47.597 \sim 64.653 \text{ mW}/\text{m}^2$ 之间, 平均值约为 $58.487 \text{ mW}/\text{m}^2$ 。

c. 地温分布的差异主要受基底构造控制, 高地温分布区恰好位于基底构造较发育的开封县城和兰考县城附近。

d. 郑州市区基底构造不发育, 加上位于凹陷区的边缘地带, 故地温梯度为全区最低。

e. 热储层埋深小于 500 m 时地温梯度随深度的增加而增大, 大于 500 m 时随深度的增加而减

少。

f. 开封凹陷区新第三系地热系统的成因模式是:传导—对流—传导, 其中传导起主要作用, 对流对区域地温分布的不均一性有重要影响。

参考文献

- [1] 乔国超, 王心义等. 河南省地热系统及综合开发利用[R]. 河南省地热科研项目报告, 郑州, 2000.
- [2] 王钩等. 华北平原中低温地热资源及其利用的环境影响[M]. 北京:地震出版社, 1992.

Geothermal field's characteristics and forming mechanisms in Kaifeng Depression

WANG Xin-yi^{1,2}, NIE Xin-liang³, ZHAO Wei-dong¹

(1. Department of Resource and Environmental Engineer, Jiaozuo Institute of Technology, Jiaozuo 454159, China; 2. Institute of Environmental Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. Water Conservation Office of Jiaozuo, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Based on the information collected from 40 geothermal wells, it is researched that the distribution characteristics of geothermal temperature, gradient and surface thermal current value in Kaifeng Depression. Combined with the study of regularities of geological structure and groundwater's movement it is demonstrated that the controlling factors of geothermal distribution and formatting mechanism thermal system.

Key words: geothermal field; geological structure; groundwater movement; Kaifeng Depression

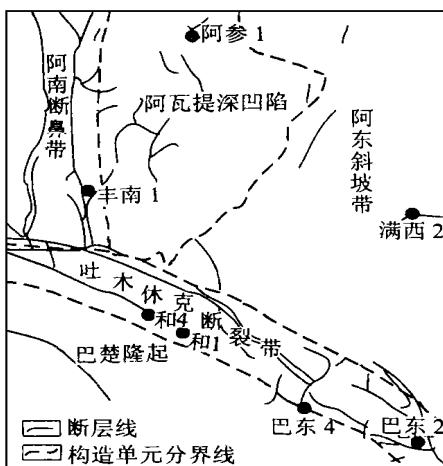


图 1 塔里木盆地大庆区块构造区划图
(图中细线为断层;粗线为构造单元分界线)

育区,并要求提供与此有关的量化参数。人们早已认识到数学力学方法在储层裂缝研究中的重要性,并已进行了许多定量方法的探索^[2,3],但都难以对复杂储层裂缝作出较为正确的判断。究其原因是在以往的研究中大多是通过应力分析预测储层裂缝,这就要涉及到储层物性方程,然而由于储层条件的复杂性,现有的物性方程或关系式很难包容,即使某些关系式可以应用,而进行应力分析和计算时也很繁琐,有时所得结果也难令人满意^[4]。储层裂缝是地质历史时期中构造运动作用的结果。在变形过程中,应变和转动同时存在,甚至转动效应相当明显。如何正确地把转动和应变分离出来,目前主要采用极分解法与和分解法。由于极分解非唯一性和不符合物理实质等使得此理论在应用上受到限制;和分解克服了经典方法的缺点,将一个物理上可能的变换函数分解为一个对称子变换和一个正交子变换的和,反映了变形体在状态变换过程中变形与转动是同时进行的固有性质,并采用拖带坐标描述法,以实时位形为基准,具有更强的实用性,目前已被广泛应用^[4~6]。本文依据局部转动和介质非协调转动将产生裂缝的思想,企图通过对碳酸盐岩储层进行有限变形转动场分析,实现储层裂缝发育区预测的目的。

2 油气储层变形转动场

据有限变形 S-R 分解定理^[7]可知,物体变形转动特性可用平均整旋角(θ)来表征。为了求局部转动,需要求位移对拖带坐标的导数及度规。如果不考虑油气储层 Z 方向位移 W 对转动角的影响,则

$$\theta = \pm \arcsin \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{g^{11}} \frac{\partial^2}{\partial x^1} - \frac{1}{g^{22}} \frac{\partial^1}{\partial x^2} \right) \right],$$

如果考虑油气储层 Z 方向位移 W 对转动角的影响,

$$\text{则 } \theta = \pm \arcsin \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{g^{11}} \frac{\partial^2}{\partial x^1} - \frac{1}{g^{22}} \frac{\partial^1}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{1}{g^{11}} \frac{\partial^3}{\partial x^1} - \frac{1}{g^{33}} \frac{\partial^1}{\partial x^3} \right)^2 - \frac{1}{g^{33}} \frac{\partial^1}{\partial x^3} \right]^2 + \left(\frac{1}{g^{22}} \frac{\partial^3}{\partial x^2} - \frac{1}{g^{33}} \frac{\partial^2}{\partial x^3} \right)^2 \right]^{1/2} \right\},$$

这里 u^1, u^2, u^3 分别为沿 x, y 和 z 方向的位移。平面转动轴垂直于转动平面,逆时针方向为正。实际计算平均整旋角(θ)时,是利用了有限单元法的插值函数来计算位移的导数,而这样做关键是要求单元节点位移。

塔里木盆地大庆区块下古生界寒武奥陶系沉积环境主要为蒸发盐台地—局限台地—开阔台地—台缘浅滩—上斜坡—下斜坡—深水盆地环境。从寒武纪早期到奥陶纪晚期,研究区沉积环境经历了深水静海盆地(玉尔吐斯组)—蒸发盐台地—局限台地和开阔海交替—深水盆地(上奥陶统)的环境变化过程。区内碳酸盐岩主要形成于蒸发盐台地、局限台地和开阔海交替的环境中,台地边缘浅滩环境不是很发育,因此,在计算中可以假定油气储层变形前为一个平面,选择固定参考系 $\{x^i\}$,拖带系 $\{w^i\}$ 嵌含在储层变形体中,拖带系 $\{w^i\}$ 初始和固定系 $\{x^i\}$ 同胚。构造变形相对位移函数形式为:

$$\begin{aligned} u^1 &= u = u(x, y) = X(x, y) - x, \\ u^2 &= v = v(x, y) = Y(x, y) - y, \\ u^3 &= w = w(x, y) = Z(x, y) - z, \end{aligned}$$

式中 (X, Y, Z) 是油气储层变形后的坐标,也就是现时坐标,它是已知的,可以从地震勘探资料中完全确定;而 (x, y, z) 是油气储层变形前的坐标,即未变形状态空间参数平面坐标,它是未知的。但是,油气储层变形前的坐标必位于参照平面上,故应有关系:

$$z = b_0 + b_1 x + b_2 y,$$

式中 b_0, b_1, b_2 — 常数。

根据地震勘探资料统计分析求得寒武系储层变形前参考平面方程为(取数据点数 $N = 11855$ 个):

$$z = -3639.062 - 0.01076x - 0.03426y,$$

中上奥陶系储层变形前参考平面方程为(取数据点数 $N = 13601$ 个):

$$z = -1375.839 - 0.010732x - 0.037429y,$$

式中 (x, y, z) — 油气储层变形前的坐标, m。

在研究中,一个点变形前的位置是通过在它附近的变形前位置坐标已知的一个或两个点来确定的,那些已知点坐标称为未知点的关联点,并假设变形区域面积大小不发生改变,同时假定储层中未知点与其关联点之间距离保持不变^[4]。在计算中节点坐标位移是通过已知点的位移来插值求得,插值方

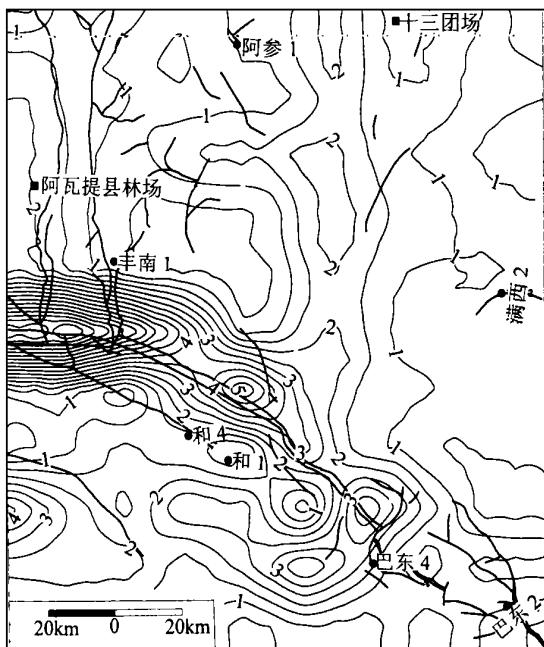


图2 大庆区块寒武系平均整旋角 θ 等值线及断层分布图
(图中粗线为断层, θ 单位为度, 坐标轴单位为m)

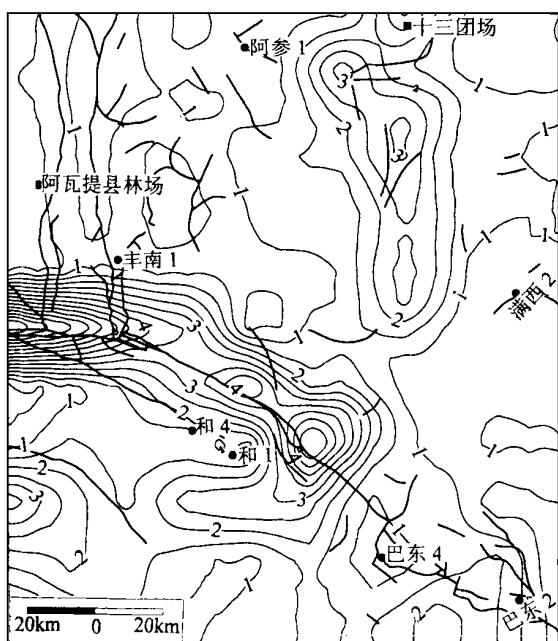


图3 大庆区块奥陶系平均整旋角 θ 等值线及断层分布图
(图中粗线为断层, θ 单位为度, 坐标轴单位为m)

法很多, 我们采用较常用的一次多项式插值函数法, 这一方法许多文献都有详细论述, 在此不再赘述。

3 研究区下古生界储层有限变形转动场分布

根据上面的计算方法, 求得区内寒武、中上奥陶系碳酸盐岩储层变形转动场分布规律, 如图2和3所示。

从图中可以看出, 研究区内寒武系、中上奥陶系

碳酸盐岩储层平均整旋角 θ 及其梯度值 $|\text{grad } \theta|$ 分布具有明显的差异性, 表现为在吐木休克断裂带, 平均整旋角 θ 及其梯度值 $|\text{grad } \theta|$ 最大, 其等值线沿断裂带呈近东西向和北西—南东方向延伸, 在断裂带西部近东西向, 东部为北西西向。在巴楚隆起的中部, 平均整旋角 θ 及其梯度值 $|\text{grad } \theta|$ 较大, 其等值线主要呈近东西向和北西—南东向展布。在吐木休克断裂带以北, 阿南断鼻带及阿瓦提深凹陷区的中东部以及阿东斜坡带的西部储层平均整旋角 θ 及其梯度值 $|\text{grad } \theta|$ 值较大, 且平均整旋角 θ 等值线方向, 除在阿瓦提深凹陷区的中东部呈近东西向外, 主要为近南北向展布。从转动场可以看出, 在吐木休克断裂带以南, 巴楚隆起区平均整旋角 θ 等值线的延伸方向明显地不同于吐木休克断裂带以北, 阿南断鼻带和阿瓦提深凹陷区以及阿东斜坡带; 在吐木休克断裂带以南, 平均整旋角 θ 等值线的延伸方向主要为近东西向和北西—南东向; 而吐木休克断裂带以北平均整旋角 θ 等值线的延伸方向主要为近南北向。这些均反映出吐木休克断裂带及其南北两侧在地质历史过程中经历了不同的构造形变和转动。

4 油气储层裂缝发育区预测

从位移连续性的角度来看, 油气储层裂缝是介质的不连续现象, 而位移的连续性是由位移协调方程所保证的。位移梯度总是包含有应变部分与转动部分。过去, 人们对转动效应重视不够, 但在实际问题中, 特别是大变形问题, 转动与应变是同等重要的, 有时转动效应甚至起主导作用。王冲博士(1991)在材料损伤断裂时已注意到这一规律, 并提出了断裂破坏的转动梯度准则^[8]。

该准则表述为: 当介质中某点的转动梯度值 $|\text{grad } \theta|$ 达临界值 $|\text{grad } \theta|_c$ 时, 该点将产生断裂, 且破坏面与该点的转动梯度矢量 $\text{grad } \theta$ 垂直^[8]。

这里提出的临界值 $|\text{grad } \theta|_c$ 可以看成是材料微结构的可曲度, 或微结构转动失稳的临界值, 可由实验测定或通过已知破坏区的位移场反算出来。

这个准则有个十分明显的优点, 即与物性关系无关, 不需作应力分析, 只要设法测得位移场, 算出 θ 并做出 θ 的等值线图或 θ 梯度等值线图即可。

图2和3中正值表示平均整旋角 θ 逆时针方向转动, θ 等值线的疏密反映着转动梯度大小的变化, 平均整旋角梯度的高值区是产生储层裂缝的分布区, 平均整旋角等值线的延伸方向将是裂缝或破碎带延展的方向。

据转动场的分布规律, 可以看出研究区内吐木

休克断裂带控制着区块内构造格局。以吐木休克断裂带为界,南、北两区构造线走向截然不同,构造形态特征各异,表现出:吐木休克断裂带及其以南的巴楚隆起区断裂走向主要呈东西向和北西—南东向,其构造形态为一背斜构造,轴部位于巴楚隆起的中部,轴向整体为北西西—南东东,表现为短轴穹状构造,因此在轴部平均整旋角 θ 及其梯度值 $|\text{grad } \theta|$ 大;而吐木休克断裂带以北断裂走向主要呈近南北方向延伸,其构造形态为一向斜构造,轴部位于中北部,轴向为北西西—南东东向,且向北西和西倾伏,因此在轴部和仰起端及其倾伏端平均整旋角 θ 及其梯度值 $|\text{grad } \theta|$ 大。从图中不难看出,研究区内断裂复杂程度表现出如下特征:

a. 以吐木休克断裂带呈近东西至北西向展布的条带,转动变形最为强烈,断裂破坏程度最高;

b. 巴楚隆起的中部呈近东西展布的条带和阿南断鼻带及阿瓦提深凹陷区的中东部以及阿东斜坡带的西部,转动变形较强烈,断裂破坏程度较高;

c. 阿瓦提深凹陷区的西部和阿东斜坡带的东部,转动变形较弱,断裂破坏程度较低。

从图 2 和 3 地震勘探结果的断层分布来看,计算结果与地震勘探获得的断层分布情况基本吻合,进一步证实了上述计算结果的正确性。

5 结论

通过上述分析得出如下结论:

a. 储层裂缝主要是地质历史时期中构造运动作用的结果,在变形过程中,应变和转动同时存在,甚至转动效应相当明显。应用有限变形力学理论实现了储层构造变形应变—转动分离,并以平均整旋角(θ)的梯度作为基本特征量,研究了储层构造变形转动场分布。根据储层变形转动不协调产生断裂的思想,储层裂缝产生的临界条件为: $|\text{grad } \theta| = |\text{grad } \theta|_{\text{cr}}$, 且破裂面与该点的转动梯度矢量 $\text{grad } \theta$ 垂直,提出了用有限变形转动场分析方法预测储层

裂缝的新途径。

b. 储层裂缝是介质的不连续现象,应用有限变形转动场分析方法,实现了对大庆区块下古生界碳酸盐岩储层裂缝区预测。研究表明,以吐木休克断裂带呈近东西至北西向展布的条带,转动变形最为强烈,断裂破坏程度最高;巴楚隆起的中部呈近东西展布的条带和阿南断鼻带及阿瓦提深凹陷区的中东部以及阿东斜坡带的西部,转动变形较强烈,断裂破坏程度较高;阿瓦提深凹陷区的西部和阿东斜坡带的东部,转动变形较弱,断裂破坏程度较低。其结果与地震勘探获得的断层分布情况基本吻合。

论文研究得到中国矿业大学(北京)任德贻教授和张鹏飞教授的关心和指导,同时也得到了邵龙义教授和刘钦甫教授的关心和帮助,在此深表感谢。

参考文献

- [1] 石彦, 鲁新便, 汤良杰. 塔里木盆地深部地质结构和盖层构造分析[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [2] Oman van Dijkum C E, Walker T. Fractured reservoir simulation and field development, Natih field [J]. Proceedings — SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Publ by Soc of petroleum Engineers of AIME, 1991, 309—320.
- [3] Sehubarth S K, Yeager R R, Murphy, D W. Advanced fracturing and reservoir description techniques improves economics in Utah, Green River formation oil project [J]. Proceedings of the Permian Basin Oil & Gas Recovery Conference, Soc Pet Eng (SPE), 1998, 249—253.
- [4] 孟召平, 王冲, 彭苏萍等. 地质构造有限变形几何分析及其应用[J]. 煤炭学报, 1998, 23(2): 119—123.
- [5] 刘波. 锚杆横向效应及综合抗力研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1998.
- [6] 陈至达. 连续介质有限变形力学几何场论[J]. 力学学报, 1979, (2): 107—117.
- [7] 陈至达. 有理力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988.
- [8] Wang chong, Chen zhida. Microrotation Effects in Material Fracture and Damage [J]. Journal of Engineering Fracture Mechanics, 1991, 38(2/3): 147—155.

Finite deformation rotation of oil and gas reservoir and its fracture prediction

— A case: Lower Paleozoic carbonate reservoir in Daqing Tract of Talimu Basin

MENG Zhao-ping, PENG Su-ping, CAO Dai-yong, ZHANG Shou-ren

(China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Using the theory of finite deformation mechanics, a displacement function of the gas and oil reservoir deformation is established, and a new method recovering the configuration before deformation of reservoir is proposed. Strain-Rotation decomposition has been made in the geological structural deformation. Adopting the gradient of mean rotation angle(θ) as the basic characteristic quantity, finite deformation rotation fields in Daqing tract of Talimu basin are studied. By the thinking that the local rotation or the discord rotation of the media will induce fractures, we forecast the fracture favorable regions of the Carbonate rock reservoir and satisfied results are gained.

Key words: Oil and gas reservoir; finite deformation; rotation field; fracture prediction