

# 基于三维古构造应力场数值 模拟的断层封闭性研究

沈传波<sup>1</sup>, 梅廉夫<sup>1</sup>, 刘立林<sup>2</sup>, 曾佐勋<sup>2</sup>, 汤济广<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 资源学院, 湖北 武汉 430074; 2 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 断层封闭性能与应力作用密切相关, 可以在考虑断面受到区域构造应力与断面上覆地层负荷联合作用的基础上, 通过计算断面所承受的正应力来研究断层封闭性。该文利用 MSC 软件公司开发的 MARC 有限单元分析软件, 以渝东油气区的 F3 断层为例, 通过三维构造应力场的数值模拟计算, 探索了断层封闭性的三维构造数值模拟方法。研究结果表明, 断层封闭性受埋深及断面倾角的影响; 三维构造应力场数值模拟方法既可研究断层在不同地质历史时期的封闭性, 也可以定量评价断层不同层段、不同部位的封闭性。

**关键词:** 断层; 断面; 正应力; 数值模拟; 封闭

**中图分类号:** TE135

**文献标识码:** A

断层对油气的封闭性能与应力作用密切相关, 钟宏平<sup>[1]</sup> (1991)、孙宝珊<sup>[2]</sup> (1995)、付广<sup>[3]</sup> (1997)、B. Maillot<sup>[4]</sup> (1998)、李亚辉<sup>[5]</sup> (1998)、童亨茂<sup>[6]</sup> (1998)、F. Beekman<sup>[7]</sup> (2000)、T. Finkbeiner<sup>[8]</sup> (2000)、周新桂<sup>[9]</sup> (2000) 等学者先后从不同的角度或不同的侧面对其进行过探讨, 一般认为断层封闭性的好坏主要受最大水平主压应力方向和断面正应力大小的影响。由于断面受到区域构造应力与断面上覆地层负荷的联合作用, 加载在断面上的正应力可以使断层带发生变形, 并使断面处裂隙闭合, 或造成断面物质压紧、研磨, 从而有利于增强断层对油气的封闭作用。当断面所受正应力大于断面处岩石抗压强度时, 封闭性好; 反之, 封闭性变差。本文将利用美国 MSC 软件公司开发的大型三维 MARC 有限单元分析软件, 以渝东油气区的 F3 断层为例, 通过三维构造应力场的数值模拟计算, 反演出古构造应力场及断面正应力的大小, 以再现不同地质历史时期断面正应力的特征; 然后根据断面所承受的正应力大小和断面处岩石抗压强度的对比, 进行断层封闭性的研究。这一方法既可研究断层在不同地质历史时期的封闭性, 也可以定量评价断层不同层段、不同部位的封闭性。

## 1 区域地质概况

渝东油气区处于四川盆地的东缘, 中上扬子地台的交接部位, 东以齐岳山断层为界, 西至长江—乌江边, 区域上属川东褶皱带, 包括方斗山复背斜、石柱复向斜、齐岳山复背斜 3 个构造单元。在漫长的地质历史中, 该油气区先后经历了加里东、海西、印支、燕山和喜山等构造运动, 具多构造旋回的特点, 断裂构造极为发育。断层控制了本区沉积构造格局和局部构造的展布, 在圈闭形成和油气运移聚集成藏中起着关键性的作用。断层 F3 形成于早侏罗纪 (燕山早期), 燕山晚期、喜山期叠加了构造活动并使断层最终定性。

## 2 数学模拟

### 2.1 思路与方法简介

构造应力场的数学模拟是伴随 60 年代后期高速、大内存电子计算机的出现而出现的, 特别是把计算数学中的有限单元法用于构造应力场分析后, 数学模拟得到迅速发展和广泛应用。到今天, 有限单元法已成为构造应力场定量研究的一个重要手

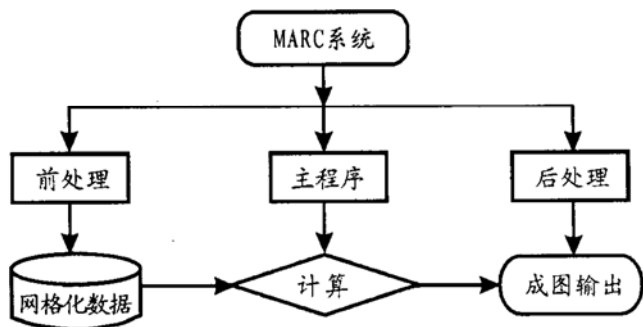


图1 MARC软件系统的组成模块图

Fig. 1 Constitutive shuttering cakes of the MARC software system

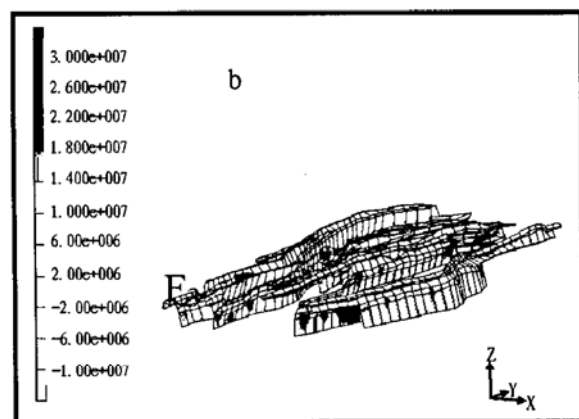
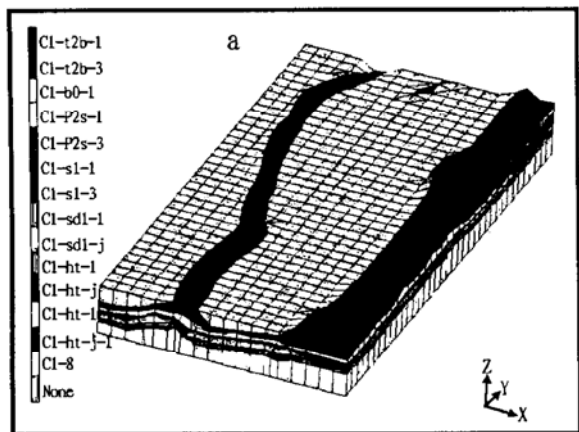


图2 三维数值模拟模型结构图(a)和断层示意图(b)

Fig. 2 Sketch diagram of the 3-D numerical simulation model a) and fault diagram b)

表1 三维模型分层及力学参数表

Table 1 Layers of the 3-D model and rock mechanical parameters

分层	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	备注	
1	J-T <sub>2b</sub>	39.942	0.188	2.5	
2	T <sub>1j</sub> -T <sub>1j</sub> <sup>4</sup>	10	0.35	2.4	滑脱层
3	T <sub>1j</sub> <sup>3</sup> -P <sub>2</sub>	55	0.1	2.6	
4	P <sub>1</sub>	50	0.15	2.6	
5	C-O <sub>3w</sub>	20.525	0.284	2.5	滑脱层
6	O <sub>2</sub> -C <sub>2</sub>	75.6	0.08	2.7	
7	C <sub>1</sub> -Z-Pt	20.525	0.284	2.8	滑脱层
	断层	1	0.38	2.2	

段<sup>[10, 11]</sup>,其基本思想可以归结为3个方面:1)有限单元的离散化;2)单元分析;3)总体分析。其意思是,将介质划分成不同的有限个单元(二维问题可以划分三角形、矩形或任意多边形等,三维模型可以划分多面体),然后对单元进行分析,最后将每个单元结合起来进行整体研究。

美国MSC软件公司开发了大型三维MARC有限单元软件,该软件系统能用于在结构力学中的工程、热传递、电磁等问题的整体解决。软件特别能针对地质体的三维空间应力场的解决,是处理此类问题的最好软件之一。MARC系统能在稳态和动态下处理线性和非线性应力问题,其中非线性问题可以由材料性质、大变形和边界条件等引起。软件可以方便地进行网格处理、空间格架的生成及图形化和后处理,用户能简便地对结果进行分析。

MARC系统的组成模块(图1)包括:1)预处理模块(Mentat):用于对模拟区自动网格化并获取有关数据;2)主模块(Marc):为了获取最终模拟数据的有限单元主运算;3)输出模块(Mentat):图件输出。

### 2.2 模型的建立

有限元模拟数学模型的建立主要包括4个方面:一是按照有限元数值分析所要求的数学、力学规则进行单元划分,三维构造数值分析的单元划分较为复杂,任一单元必须考虑上下、前后、左右的匹配关系;二是岩石力学参数的确定;三是根据区域地质分析,确定位移边界条件,给予模型合理的边界约束;四是根据研究区的区域背景应力条件以及实测点的应力状态,确定模型合理的加力条件<sup>[12-14]</sup>。

#### 2.2.1 模型单元的划分及力学参数的确定

在区域地质资料分析的基础上,依据鄂西渝东油气区地层及构造的特点,按六面体单元划分基质,断层作为片状体处理,将模型划分为6319个单元,计8888个结点(图2)。考虑到不同层的岩石力学性质的差异,特别是断层、滑脱层和基质的不同,将模型分为7个层,其力学参数通过区内的地震波速计算获得(表1)。

#### 2.2.2 边界及加力条件的确定

模型在燕山早期主要受到来自雪峰-武陵的从南东向北西的远程挤压作用,同时还受到了来自大巴山向南的挤压作用,将这两个边界作用力分别加在模型的南东边界和北部边界;模型北西边界和底部边界取刚性约束,北东和南西边界取Y方向约束(表2)。在燕山早期模拟结果的基础上考虑残余应力计算燕山晚期的应力场。模型燕山晚期动力学机

表 2 三维模型边界条件一览表

Table 2 Boundary terms of the 3-D model

边界	条 件		
	燕山早期	燕山晚期	喜山期
底部边界	刚性约束	刚性约束	指向上 50 MPa
南东边界	指向北西	指向南东	向北西的位移
	50~ 100 MPa	50~ 100 MPa	50~ 100m
北部边界	指向南	无	无
	50~ 100 MPa		
北西边界	刚性约束	刚性约束	向南东的位移 50~ 100m
北东边界	Y 方向约束	Y 方向约束	Y 方向约束
南西边界	Y 方向约束	Y 方向约束	Y 方向约束

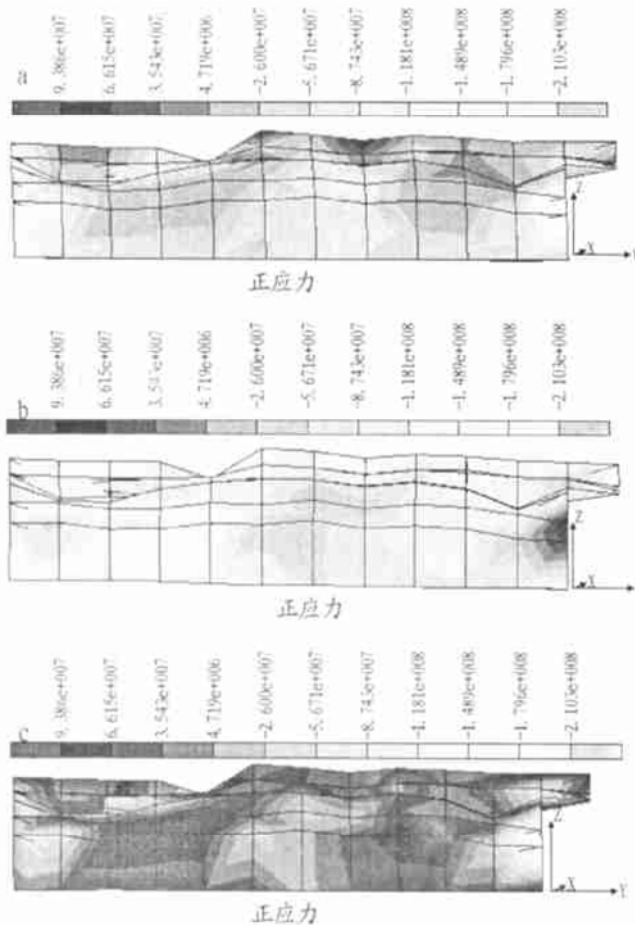


图 3 断层不同时期的数值模拟正应力的大小  
a) 燕山早期; b) 燕山晚期; c) 喜山期

Fig. 3 Size of normal stress for the different periods of F<sub>3</sub> fault by the numerical simulation

制主要地幔的隆升变化, 将边界作用力加在模型的南东边界; 模型北西边界和底部边界取刚性约束, 北东和南西边界取 Y 方向约束(表 2)。在燕山晚期模拟结果的基础上考虑残余应力计算喜山期的应力场。模型喜山期动力学机制主要考虑地幔的隆升作用和南东及北西边界的作用, 将边界作用力加在模型的底部和南东及北西边界, 南东及北西边界的作用力通过位移进行加载; 模型北东和南西边界取 Y 方向约束(表 2)。

### 2.3 模拟结果

断层断开二、三、四、五、六等 5 个层位。从图 3 可以看出, 不同层、不同部位断面正应力大小分布差异很大。随着层位由上到下正应力有增大的趋势, 高异常值主要分布于断层的两端及断面倾角由缓变陡的转折部位等应力集中区; 断层顶部在挤压背景下可能出现局部的拉张, 在拉张作用下可能会出现局部的挤压。

燕山早期(图 3a) 正应力大小在 + 15~ - 180 MPa 之间(“+”表示拉张作用,“-”表示挤压作用)。其中第 2 层东段正应力大小在 + 10~ - 20MPa 之间, 中段为 + 10~ - 10MPa, 西段约为 - 25MPa; 第 3 层东段正应力大小在 - 20~ - 60MPa 之间, 中段约为 - 55MPa, 西段为 0~ - 50MPa; 第 4 层东段正应力大小在 0~ - 60MPa 之间, 中段约为 - 60MPa, 西段为 - 10~ - 70MPa; 第 5 层东段正应力大小在 - 10~ - 100MPa 之间, 中段约为 - 70MPa, 西段为 - 20~ - 70MPa; 第 6 层东段正应力大小在 - 20~ - 100MPa 之间, 中段约为 - 80MPa, 西段为 - 25~ - 80MPa。

燕山晚期(图 3b) 正应力大小在 - 8~ + 30MPa 之间。其中第 2 层东段正应力大小在 0~ - 6MPa 之间, 中段约为 - 5MPa, 西段为 - 10~ + 5MPa; 第 3 层东段正应力大小在 0~ - 5MPa 之间, 中段约为 0~ 12MPa, 西段为 - 5~ + 10MPa; 第 4 层东段正应力大小在 0~ + 15MPa 之间, 中段约为 + 5~ + 15MPa, 西段为 0~ + 5MPa; 第 5 层东段正应力大小在 0~ + 15MPa 之间, 中段约为 + 5~ + 20MPa, 西段为 0~ + 15MPa; 第 6 层东段正应力大小在 5~ 20MPa 之间, 中段约为 5~ 20MPa, 西段为 5~ + 18MPa。

喜山期(图 3c) 正应力大小在 0~ - 130MPa 之间。其中第 2 层东段正应力大小在 0~ - 10MPa 之间, 中段约为 - 5MPa, 西段为 0~ - 10MPa; 第 3 层东段正应力大小在 0~ - 15MPa 之间, 中段约为 - 8 MPa, 西段为 - 10~ - 30MPa; 第 4 层东段正应力大小在 - 5~ - 15MPa 之间, 中段约为 - 8.5MPa, 西段为 - 10~ - 40MPa; 第 5 层东段正应力大小在 - 20~ - 90MPa 之间, 中段约为 - 20~ - 75MPa, 西段为 - 20~ - 70MPa; 第 6 层东段正应力大小在 - 35~ - 80MPa 之间, 中段约为 - 35~ - 65MPa, 西段为 - 35~ - 60MPa。

## 3 断层封闭性分析

由岩石力学手册<sup>[15]</sup>并结合本区地层岩石的特

表3 断面正应力大小与断层封闭性评价表  
Table 3 Size of normal stress and evaluation of fault sealing

地史时期	层段	抗压强度/ MPa	封闭性分析					
			西段正应力/ MPa	西段 封闭性	中段正应力/ MPa	中段 封闭性	东段正应力/ MPa	东段 封闭性
燕山早期	$T_{ij} - T_{ij}^4$	135~ 165	- 10	差	- 25	差	- 15	差
	$T_{ij}^3 - P_2$	38~ 90	- 25	中等	- 55	较好	- 40	较好
	$P_1$	27~ 38	- 30	较好	- 60	好	- 30	较好
	$C - O_{3w}$	34~ 115	- 45	中等	- 70	较好	- 55	中等
	$O_2 - C_2$	38~ 75	- 52.5	较好	- 80	好	- 60	好
燕山晚期	$T_{ij} - T_{ij}^4$	135~ 165	- 2.5	差	- 5	差	- 3	差
	$T_{ij}^3 - P_2$	38~ 90	+ 2.5	差	+ 6	差	- 2.5	差
	$P_1$	27~ 38	+ 5	差	+ 10	中等	+ 7.5	较差
	$C - O_{3w}$	34~ 115	+ 7.5	差	+ 12.5	较差	+ 7.5	差
	$O_2 - C_2$	38~ 75	+ 11.5	较差	+ 15	较差	+ 12.5	较差
喜山期	$T_{ij} - T_{ij}^4$	135~ 165	- 10	差	- 5	差	- 10	差
	$T_{ij}^3 - P_2$	38~ 90	- 20	中等	- 8	差	- 12	较差
	$P_1$	27~ 38	- 25	较好	- 8.5	较差	- 10	中等
	$C - O_{3w}$	34~ 115	- 45	较好	- 47.5	较好	- 55	较好
	$O_2 - C_2$	38~ 75	- 30	中等	- 50	好	- 57.5	好

注：“+”表示燕山晚期的拉张作用；“-”表示燕山早期、喜山期的挤压作用。

性. 测定所分层的岩石抗压强度为:  $T_{ij} - T_{ij}^4$  灰岩、膏盐岩 135~ 165MPa;  $T_{ij}^3 - P_2$  鲕粒灰岩、粉晶灰岩、生屑灰岩夹硅质条带 38~ 90MPa;  $P_1$  泥晶灰岩、生屑灰岩 27~ 38MPa;  $C - O_{3w}$  粉细晶云岩、针孔云岩、颗粒云岩 34~ 115MPa;  $O_2 - C_2$  泥质白云岩夹泥页岩 38~ 75MPa。根据断面所承受的正应力大小(取平均值)和断面处岩石抗压强度的对比,分析断层在不同地质历史时期、不同层段、不同部位的封闭性如表3所示

由表可知,所研究的断层  $F_3$  在不同地质历史时期的不同层段、不同部位,断面正应力大小造成的封闭效果是不同的。一般较强的挤压作用往往有利于增强断层对油气的封闭性能,而拉张作用则往往造成油气的逸散。断层封闭与埋深有关,一般埋藏越深越有利于断层封闭<sup>[5,16]</sup>。 $F_3$  断层控制的圈闭位于断层的东段、勘探目的层为  $C$ ,可见其封闭性在燕山早期为中等、燕山晚期差、喜山期(现今)较好。钻探结果表明断层  $F_3$  现今的封闭性较好,但油气充满度较低,地质分析认为是燕山晚期的拉张泄压作用的影响。可见数值模拟结果与地质分析及钻探结果是相吻合的。

### 4 结论

由上述的分析,可以得到如下结论:

1) 断层对油气的封闭性能与应力作用密切相关,断面正应力大小可作为定量评价断层封闭性能

的一个重要判据。并且,一般挤压作用越强越有利于增强断层对油气的封闭性能,而拉张作用则往往造成油气的逸散。断层的封闭性还受埋深、断面倾角的影响,一般埋藏越深越有利于断层封闭,断面倾角由缓变陡的转折部位或空间上的弯曲部位等应力集中区也比较有利于油气的聚集。

2) 对于同一条断层,不同地质历史时期的不同层段、不同部位,断层的封闭效果是不同的。因此,在对与断层相关的具体的圈闭进行评价时,应首先弄清楚圈闭在断层的什么部位及勘探目的层,然后区分对待不同层段、不同部位断层的封闭性,而不是笼统地对整条断层封闭性进行评价;而且在不同的地质历史时期断层的封闭性是变化的,因此也应重视断层封闭演化史的研究。

3) 三维构造应力场数值模拟方法是一种方便、简洁并具有可视化特点的好的断层封闭性研究方法,它既可研究断层在不同地质历史时期的封闭性,也可以定量评价断层不同层段、不同部位的封闭性。

### 参考文献:

[1] 钟宏平,傅康英,黄仙英.含油气盆地断层封闭性研究进展论述[J].地质科技情报,1991,10(2):51-55.  
 [2] 孙宝珊,周新桂,邵兆刚.油田断裂封闭性研究[J].地质力学学报,1995,1(2):21-27.  
 [3] 付广,李玉喜,张云峰,等.断层垂向封闭性研究方法及其应用[J].天然气工业,1997,17(6):22-25.  
 [4] Maillot B, Cowie P, Lague D. Simulating polyphase faulting with a tansorial 3-D of fault growth [A]. Jones G, Fisher Q J, Knipe R J. Faulting, Fault Sealing and Fluid Flow in Hydrocarbon Reservoirs

- [M]. Geological Society Special Publication, 1998, 147: 207- 217.
- [5] 李亚辉, 刘泽容, 陈 利. 断层封闭演化史研究方法及其应用 [J]. 石油大学学报, 1998, 22(3): 15- 18.
- [6] 童亨茂. 断层开启与封闭的定量分析 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 215- 220.
- [7] Beekman F, Badsı M, Wees J D. Faulting, fracturing and in situ stress predication in the Ahnet Basin, Algeria- a finite element approach [J]. Tectonophysics, 2000: 311- 329.
- [8] Finkbeiner T, Zoback M, Fleming P, et al. Stress, pore pressure and dynamically constrained hydrocarbon columns in the South Eugene Island 330 field, north Gulf of Mexico [J]. AAPG, 2000, 84: 1007- 1031.
- [9] 周新桂, 孙宝珊, 谭成轩, 等. 现今地应力与断层封闭效应 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 127- 131.
- [10] 梅廉夫. 沉积盆地应力场分析 [A]. 费 琪. 成油体系分析与模拟 [C]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 234- 256.
- [11] 刘翠荣. 东海西湖凹陷中新世构造应力场数值模拟及油气有利聚集区预测 [J]. 石油实验地质, 2002, 24(1): 73- 78.
- [12] 龙驳球. 有限单元法概论 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1981. 16- 31.
- [13] 宋惠珍. 地应力场综合研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990. 62- 86.
- [14] 张功成. 裂陷盆地构造- 热演化模拟 [J]. 石油实验地质, 1998, 20(1): 49.
- [15] 安 欧. 构造应力场 [M]. 北京: 地震出版社, 1992. 90- 107.
- [16] 鲁 兵, 丁文龙. 断层封闭性研究进展 [J]. 地质科技情报, 1998, 17(3): 75- 80.

## STUDY OF FAULT SEALING BY THE 3-D PALEO-TECTONIC NUMERICAL SIMULATION

SHEN Chuan-bo<sup>1</sup>, MEI Lian-fu<sup>1</sup>, LIU Li-lin<sup>2</sup>, ZENG Zuoxun<sup>2</sup>, TANG Ji-guang<sup>1</sup>

(1. Department of Earth Resources, China University of Geology, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Department of Geosciences, China University of Geology, Wuhan, Hubei, 430074, China)

**Abstract:** Fault sealing is closely related to the function of stress. Therefore, we can study fault sealing through calculating the size of normal stress of fault plane, on the basis of considering overburden load and regional major compressive stress. The text discussed the approach to the 3-D tectonic numerical simulation of fault-sealing research by use of the MARC finite element analysis software of American's MSC software company, and cited an example—one fault in Yudong area. The results revealed that the deep and slant angle of fault plane affected fault sealing. And they also expressed that the approach of the 3-D tectonic numerical simulation can not only study the fault-sealing history, but also evaluate the sealing of different layers and different parts.

**Key words:** fault; fault plane; normal stress; numerical simulation; sealing