

文章编号: 0253- 9985(2004) 01- 0070- 05

川西坳陷孝泉- 新场地区须家河组二- 四段 构造应力场模拟及裂缝发育区带预测

张守仁¹, 万天丰¹, 陈建平²

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 辽宁工程技术大学资源环境学院, 辽宁阜新 123000)

摘要: 弹- 塑性增量法应力场模拟, 就是用若干个直线段去逼近抛物线型应力- 应变曲线, 在每个直线段中按有限元法进行弹性模拟计算。运用该方法对孝泉- 新场地区须家河组二- 四段构造应力场进行了精细数值模拟。结果显示孝泉- 新场地区为一构造裂缝不发育地区, 仅断裂带附近区域构造裂缝较发育。经地震剖面解释及构造演化分析, 该区主要断裂带是油气运移的良好通道, 且不存在油气的严重漏失。因此, 断裂带附近区域是天然气勘探最有利区域, 特别是近东西向断裂与现今主应力方向平行, 表现为开启性, 对天然气的导通作用更为明显。

关键词: 构造应力场; 弹塑性增量法; 构造裂缝; 油气勘探

中图分类号: TE122. 1 文献标识码: A

Tectonic stress field modeling and fracture prediction in T_3x^{2-4} strata in Xiaoquan-Xinchang area, western Sichuan depression

Zhang Shouren¹ Wan Tianfeng¹ Chen Jianping²

(1. China University of Geosciences, Beijing;

2. College of Resources and Environment, Liaoning Engineering and Technology University, Fuxin, Liaoning)

Abstract: Elastic-plastic incremental modeling of tectonic stress field is to approximate parabolic stress-strain curves with several linear portions and perform elastic modeling with finite element method in each linear portion. It is applied to perform numerical simulation of the tectonic stress field in T_3x^{2-4} strata in Xiaoquan-Xinchang area. Modeling results show that structural fractures are poorly developed in this area, except in the near-fault regions where regional structural fractures are relatively well developed. Seismic section interpretation and structural evolution analysis reveal that the main fractured zones are good hydrocarbon migration pathways and no serious leakage of hydrocarbons exists. Therefore, favorable regions for gas exploration are those neighboring faults, especially the near E-W trending faults which are parallel with the current major stress and in open state can more effectively conduct gas.

Key words: tectonic stress field; elastic-plastic incremental method; structural fracture; petroleum exploration

孝泉- 新场地区须家河组二- 四段(以下简称须二- 四段)为典型的致密性砂岩储层, 对该层段天然气勘探取得突破的关键是构造裂缝发育区带的预测^[1]。

1 原理

在地球上的岩石变形, 一般都是长时期、极低应变速率的塑性变形^[2]。因此最合理的模拟方

案, 应该采用流变过程来处理, 即必须用流变方程来描述

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \exp \left| \frac{-Q}{10^3 RT} \right|$$

式中 $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, σ 为构造应力, T 为温度, A 为材料的热敏系数, Q 为蠕变活动能量, n 为应力指数, R 为气体常数。应力指数 n 对于应变速率 $\dot{\epsilon}$ 影响极大, 其微小误差就会导致 $\dot{\epsilon}$ 产生指数级的

误差, 从而使模拟计算的精度降低, 甚至无法进行, 这将导致模拟过程非常复杂。因此, 到目前为止, 国内外至今无人进行流变过程的构造应力场有限元数值模拟。有人用粘弹性来近似地模拟此过程, 但实际上都做不到粘性问题的计算, 而只是按弹性问题处理^[3]。

为了比较逼近流变过程下塑性材料的构造应力场数值模拟, 本文采用增量法来模拟岩石的塑性变形, 即用若干个直线段逼近抛物线型应力-应变曲线(图 1), 第一个直线段描述弹性阶段, 而其后不同斜率的直线段则是模拟塑性变形, 在每个直线段内按有限元法进行弹性问题模拟计算, 这是本数值模拟源程序的重要特色。

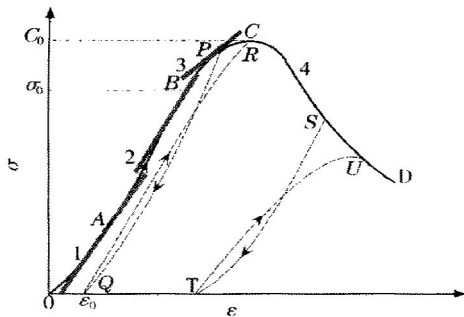


图 1 岩石变形全应力-应变曲线

Fig. 1 Whole stress-strain curve of rock deformation

2 模型

建立构造应力场模拟地质模型, 也就是确定一系列地质参数。这些参数包括构造应力场分期、构造应力方向、构造应力值大小、变形介质岩相-地质模型和变形介质物性参数。它们既是构造应力场模拟的依据, 又是检验构造应力场模拟结果的约束条件。

(1) 构造应力场分期, 即确定形成孝泉-新场背斜、对须二-四段裂缝形成起重要作用的构造事件, 为构造应力场模拟时一系列参数的确定提供基础依据。据区域地质背景及该背斜的分布特征, 本文认为该构造事件应为早白垩世中期-古新世期间的四川期构造运动^[4~6], 构造期年龄为 135~52 Ma, 构造变形的高潮期发生在古新世和早始新世(96~52 Ma)^[7]。

(2) 构造应力方向确定, 即构造应力场模拟时施加外荷作用力的方向确定, 也是检验模拟结果

的标准。包括古构造应力场方向确定和现代构造应力场方向确定。古构造应力场方向依据孝泉-新场背斜构造的产状特征来确定, 现代构造应力场方向依据现代天然地震学的研究成果(断层面解或称震源机制解)来确定^[8]。

(3) 构造应力值大小测定, 包括古构造应力值测定和现代构造应力值计算。实测构造应力值是检验模拟结果的标准。古构造应力值测定采用晶格位错密度法, 测试结果见表 1。现代构造应力值计算采用水力压裂资料计算获得, 计算结果见表 2, 表格中的 $\Delta\sigma$ 为最大水平主应力与最小水平主应力的差值($\sigma_1 - \sigma_3$), 剪应力 $\tau = \Delta\sigma/2$ 。

表 1 孝泉-新场地区古构造应力值计算表

Table 1 Computation chart of palaeotectonic stresses in Xiaoquar Xinchang area

采样井号	层位	深度/m	岩性	电镜照片数/张	差应力值/MPa
CX323	J ₂ s ³	1 800	细砂岩	6	58.6
X807	J ₂ s	2 260	砂岩	7	54.8
CX96	J ₂ s	2 552.63	细砂岩	7	58.4
CX170	J ₂ s	2 319.1	细砂岩	10	63.4
CX167	J ₂ s	2 343	细砂岩	11	65.2
CX94	T ₃ x ⁴	3 424	细砂岩	10	61.4
L102	J ₂ s	2 250.63	细砂岩	8	63.9
CX157	J ₂ s	2 692	砂岩	10	63.2
CX370	J ₂ s	2 292	细砂岩	8	57.9

注: 构造应力值由中国地质大学曹秀华老师于北京理化测试中心测定

(4) 岩相地质模型的建立, 是应力场模拟单元剖分的基础。根据孝泉-新场地区须二-四段沉积相图和构造图, 并结合断裂形成期次, 将变形介质分为如下 6 种类型: (A) 砂岩含量 50%~60%; (B) 砂岩含量 60%~70%; (C) 砂岩含量 70%~80%; (D) 砂岩含量 80%~90%; (E) 断裂带: 古构造期及新构造期分别已经形成的断裂; (F) 构造弱化带: 小断裂及古构造期尚未形成的断裂分布区。

(5) 变形介质物性参数, 即确定弹性模量和泊松比, 通常由岩石力学试验来获得。这次我们收集了研究区内具有代表性的 30 口井的力学参数^[9], 在对比分析的基础上, 设定了这次构造应力场模拟的 3 次增量及各种材料的岩石物性参数(表 3)。

表 2 孝泉- 新场地区现代构造应力值计算表

Table 2 Computation chart of current tectonic stresses in Xiaoquar Xinchang area

井号	储层	井深/m	σ_1 /MPa	P_r /MPa	S_1 /MPa	σ_3 /MPa	P_o /MPa	$\Delta\sigma$ /MPa	τ /MPa
X801	J _{2s} ¹	2 170	67. 62	55. 51	—	—	—	—	—
CX133	J _{2s} ¹	2 282	65. 62	52. 42	2. 38	50. 04	34. 46	15. 58	7. 8
X804	J _{2s} ^{3- 1}	2 333	58. 40	52. 16	3. 59	48. 99	40. 00	9. 41	4. 7
L101	J _{2s} ^{3- 2}	2 341	60. 20	51. 20	0. 80	50. 40	40. 60	9. 80	4. 9
CX166	J _{2s} ^{3- 2}	2 346	61. 75	55. 02	—	52. 07	—	9. 68	4. 8
CX162- B	J _{2s} ^{3- 2}	2 358	56. 76	48. 88	1. 80	47. 08	37. 40	9. 68	4. 8
X815	J _{2s} ⁴	2 377	68. 54	58. 97	3. 59	54. 64	40. 00	13. 90	7. 0
CX153- 2	J _{2s} ⁴	2 394	63. 56	58. 26	3. 59	54. 14	44. 19	9. 42	4. 7
CX136	J _{2s} ⁴	2 407	74. 88	61. 10	3. 20	57. 90	40. 92	16. 98	8. 5
CX164	J _{2s} ⁴	2 444	67. 90	60. 40	2. 70	57. 70	48. 39	10. 20	5. 1

注: σ_1 —最大主应力; P_r —初始破裂压力; S_1 —岩石抗张强度; σ_3 —最小主应力; P_o —流体孔隙压力; $\Delta\sigma$ —差应力; τ —剪应力

表 3 岩石物性参数设定表

Table 3 List of petrophysical parameters

增量次数	物性参数	第一种材料(砂岩 含量 80%~ 90%)	第二种材料(砂岩 含量 70%~ 80%)	第三种材料(砂岩 含量 60%~ 70%)	第四种材料(砂岩 含量 50%~ 60%)	第五种材料 (断裂带)	第六种材料 (构造弱化带)
1	E /MPa	45 000	42 000	40 000	38 000	17 000	25 000
	μ	0. 16	0. 19	0. 22	0. 24	0. 3	0. 26
2	E /MPa	40 500	37 800	36 000	34 200	15 300	22 500
	μ	0. 192	0. 228	0. 264	0. 288	0. 36	0. 312
3	E /MPa	31 500	29 400	28 000	26 600	11 900	17 500
	μ	0. 224	0. 266	0. 308	0. 336	0. 42	0. 364

注: E 为弹性模量; μ 为泊松比

3 结果

3.1 构造应力场

本次模拟的是孝泉- 新场地区须二—四段的平面应变问题, 即不考虑体力及地质模型在垂向上的位移。根据三角剖分结果, 在 X 方向及 Y 方向分别给予 96 个外荷作用力。为了使地体不发生大幅度漂移, 把地质模型左上角及右下角的两个节点设为约束点, 限制其位移量为 0. 5 个单位。在计算中保证模型所受外力的合力必须等于零, 外力的合力矩也必须等于零, 即必须做到外荷作用力系平衡。

根据本增量法源程序的规定, 选用 3 次增量计算, 就需要给予 3 组平衡的外荷作用力。考虑到第一次增量是弹性阶段, 一般在脆性变形条件下, 岩石的弹性域常为岩石变形的主体部分, 因而在第一次增量计算时把各外荷作用力选择为各总外荷作用力的 70%; 第二次增量计算时选择为总外荷作用力的 20%; 第三次增量计算时选择总外

荷作用力的 10%。经过反复调整各边界点上外荷作用力的大小, 不断模拟调整, 不断逼近, 在保证力系平衡的前提下, 如果模拟计算的主应力方向与实测主应力方向的偏差小于 5°, 并且模拟计算的剪应力值与实测剪应力值误差小于 5 MPa, 那么就认为模拟结果是在误差范围以内。

3.2 裂缝发育带

(1) 孝泉-新场地区为一构造裂缝不发育地区。据本次古构造应力场剪应力值模拟结果(图 2)可以看出, 在孝泉- 新场复式背斜轴部, 古构造应力场剪应力值差别并不是很大, 除断裂附近剪应力值较小外(最小 27 MPa), 其余地区多稳定在 30~ 32 MPa, 剪应力值最大相差也不过 5 MPa 左右。剪应力值相对较稳定, 说明该地区没有出现过明显的应力集中或应力释放的区域, 也就是应力差值较小, 不足以产生构造裂缝。

此外, 据近几年来我国地质工作者对我国各地区古构造应力值的研究, 现已在各地地区利用晶格位错密度法测定了 104 个样品的四川期古构造

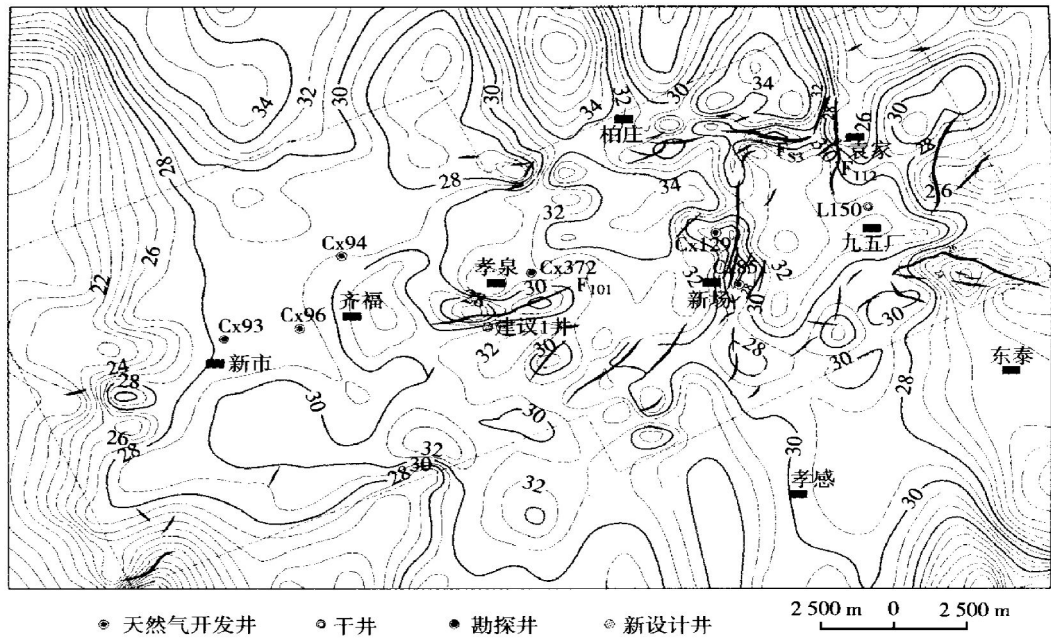


图 2 孝泉- 新场地区四川期古构造应力场剪应力等值线图(剪应力值单位: MPa)

Fig. 2 Contour map showing shear stresses in palaeotectonic stress field during Sichuan period in Xiaoguan Xinchang area (unit of shear stress: MPa)

差应力值^[7](表 4)。由表中可以看出,我国各地区四川期古构造差应力值分布各异,最大的可达 183 MPa,最小的 60.8 MPa,与其他地区相比,孝泉- 新场地区古构造差应力值最小,比其他地区最少也差 15MPa。构造裂缝的形成虽然受多种因

素控制,但构造应力是一主要影响因素,构造应力值越小,说明该地区岩层受破坏程度越弱,因此,孝泉- 新场地区的构造裂缝发育程度相对较弱。

(2) 据本模拟软件的基础理论,岩层破坏强度(构造裂缝发育程度)最大的区域应该位于构造剪应力值极大或者极小的区域^[3]。构造剪应力值越大,岩层变形程度也越大,即构造裂缝也越发育;而在断裂分布区域,由于构造活动已破坏了岩层的完整性,构造应力已得到部分释放,因此构造剪应力值往往最小,但由于这些地区往往会出现较多的派(或伴)生小断层及节理,因此这些地区构造裂缝也较发育。

对于孝泉- 新场地区,由于构造活动相对较弱,构造剪应力值相差不大,没有出现明显的构造剪应力高值区。因此,根据现有的资料并结合古构造应力场模拟成果来分析(图 2),我们认为孝泉- 新场地区构造裂缝较发育的地区,主要应该位于区内断裂带附近。至于断裂对于油气成藏的漏失作用,我们认为可能并不严重或没有漏失。

4 讨论

(1) 该区断裂是天然气成藏的良好通道,而且不存在油气的严重漏失。图 3 为孝泉- 新场地区主要断裂(F₅₈, F₁₀₁, F₁₁₂, F_{S3}断裂)的地震剖面图。

表 4 我国各地区四川期古构造应力测定值对照表^[7]

Table 4 Comparison of measurements of palaeotectonic stresses in Sichuan period in different areas in China

地区	位错密度法 样品点数	差应力 平均值/MPa	构造应力 场期次	资料来源
西藏阿里	2	183	四川期	A
孝泉- 新场	9	60.8	四川期	B
福建	9	86.3	四川期	C
浙江	17	81.7	四川期	D
长江中下游	16	90.29	四川期	E
桐柏山	3	140.5	四川期	F
熊耳山	2	120.6~121.6	四川期	G
秦岭	2	147	四川期	H
山东东部	7	81.8	四川期	I
山东西部	14	77.8	四川期	I
河北易县	1	81.6	四川期	J
河北沽源	1	94.6	四川期	J
吉林大黑山	19	102.1	四川期	K
云南兰坪	2	158.2	四川期	L

资料来源: A—郭铁鹰, 万天丰(1988); B—本文; C—林建平, 万天丰(1990); D—褚明记, 万天丰(1988); E—万天丰等(1990); F—周乐群(1991); G—曹秀华, 万天丰(1990); H—柴育成(1986); I—万天丰(1992); J—曹秀华, 任之鹤; K—林建平(1992); L—彭斯震(1992)

表 1 松南十屋断陷天然气成藏期次与特征一览表

Table 1 Stages and features of gas accumulations in Shiwu fault depression in Southern Songliao basin

成藏期次	源岩	天然气运移			储层	圈闭特征	成藏时期	成藏方式	实 例	聚集效率
		排烃方式	运移方向	距离						
早期成藏		脉冲式垂向排烃	斜坡	近	登娄库组、营城组	同沉积圈闭	营城组末期	近源式(自生自储式)	四五家子油气田、八屋气田小城子及五家子气藏	多散失
中期成藏	沙河子组营城组为主、登娄库组为辅	脉冲式垂向排烃	斜坡	远	登娄库组、泉头组	登娄库组末期形成圈闭	登娄库组末期~泉头组早期	远源式(跨越式)	孤家子气田、后五家户气田小城子及农安气藏	较好
晚期成藏		脉冲式卸载式垂向排烃	斜坡	远	登娄库组、泉头组	早期形成的圈闭、嫩江组末期改造或形成的圈闭	嫩江组末期	远源式(跨越式)	后五家户气田、杨大城子气藏	较好

4.4 气藏特点

4.4.1 气藏类型多

松南地区由于经历了多期构造运动,各期构造运动都形成一批相应的圈闭,由于圈闭类型多,不同的圈闭类型形成不同类型的气藏,因此松南地区下白垩统气藏类型较多。目前已发现的气藏类型以构造气藏和构造-岩性复合型气藏为主,构造气藏类中以断背斜型和断块断鼻型气藏为主,尚未发现典型的岩性气藏。

4.4.2 气藏规模小且分布零星

据目前已有的勘探及开发成果,在下白垩统中已发现的气田一般多为中小型,以小型占多数。开采气田时发现单个气藏规模小、充满度低、产量递减快,含气砂体间连通性较差,非均质性强,结果导致纵向上有多个气水系统,横向上井与井之间、断块与断块之间天然气产状均不相同。总体反映了气藏的复杂性。

参 考 文 献

1 何兴华,崔皓,赵庆吉,等.松辽盆地东南部天然气成藏地质条件及远景评价[A].见:地质矿产部石油地质研究所.石油与天然气地质文集(第5集)(中国油气勘探战略与规划部署)[C].北京:地质出版社,1997.64~65

2 Demaison G, Huizinga B J. Genetic classification of petroleum systems [J]. AAPG Bull, 1991, 75(10): 1 626~ 1 643

3 黄福林,骆传才,何兴华,等.松辽盆地南部构造圈闭系列[J].石油与天然气地质,1996,17(4): 333~ 336

4 陈孔全,吴金才,唐黎明,等.松辽盆地南部断陷成藏体系[M].武汉:中国地质大学出版社,1999. 93~ 97

5 王庭斌.中国气田的成藏特征分析[J].石油与天然气地质,2003,24(2): 103~ 110

6 吴金才,兰素清.松南地区十屋断陷构造-岩性复合圈闭样式[J].石油与天然气地质,2003,24(1): 62~ 64

7 王果寿.松辽盆地十屋-德惠地区沉积体系特征[J].石油与天然气地质,2001,22(4): 331~ 336

8 唐黎明,何兴华.松辽盆地梨树凹陷泉头组沉积特征[J].石油与天然气地质,2002,23(3): 266~ 268

9 李群.松辽盆地南部隐蔽圈闭及有利地区预测[J].石油与天然气地质,2002,23(2): 159~ 161

(上接第 74 页)

3 万天丰.古构造应力场[M].北京:地质出版社,1988

4 赵宗举,朱琰,李大成,等.中国南方构造变形对油气藏的控制作用[J].石油与天然气地质,2002,23(1): 19~ 25

5 刘树根,罗志立,戴苏兰,等.川西前陆盆地的“四川运动”及与油气的关系[J].石油与天然气地质,1996,17(4): 276~ 281

6 吴志均,杨宇,刘应楷.新场气田上沙溪庙组的应力场特征[J].石油与天然气地质,2003,24(2): 136~ 139

7 万天丰.中国东部中、新生代板内变形构造应力场及其应用[M].北京:地质出版社,1996

8 崔效峰,谢富仁.利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J].地震学报,1999,21(5): 513~ 522

9 余琪祥,吴爱军,李善良,等.地应力剖面在储层开发中的应用[J].石油与天然气地质,2001,22(1): 42~ 47