

冀鲁帚状构造体系应力场的初步数学模拟

刘泽容 楚泽涵

王孝陵

(华东石油学院勘探系) (北京石油勘探开发科学研究院)

帚状构造体系是地壳上广泛存在的一种构造型式,在不均匀的旋扭应力场中生成,对其展布范围内的地质构造特征、成生发育历史都有特定的控制作用。对于帚状构造,目前从鉴定其存在、认识其成生发育史、应力作用方式及其控矿作用的角度研究较多,而研究其应力场较少。冀鲁帚状构造是我国东部的巨型控油帚状构造,其展布地区(冀鲁地区)已探明油气地质储量在全国总储量中占有相当大的比重。本文试图以对该体系已有的研究成果为基础,用弹性平面有限元法进行其应力场的数学模拟,以利认识该体系应力场特征、变化趋势及其控油作用,并探索帚状构造应力场的研究方法。

一、冀鲁帚状构造简介^[1]

冀鲁帚状构造位于新华夏系第二沉降带华北沉降区,面积约22万平方公里。砥柱为鲁西隆起,遗留了不完全旋扭的痕迹;旋回层为冀鲁沉降区(即渤海湾盆地郑庐断裂带以西部分),由相间排列、帚状展布的两排隆起带和三排拗陷带组成五个一级旋回层,向北东撒开、向南西收敛,其基本构造特征反映了与砥柱的成生联系。在冀鲁沉降区中,近砥柱的旋回层构造线弧形曲率大,远离砥柱则曲率变小,局部构造和二级构造带组合成左行排列的多字型,具有明显的扭动特点;其中内旋层济阳拗陷弧形断裂和次级旋扭构造发育,中旋层黄骅拗陷发育较少,外旋层以直扭潜山构造带为特征。冀鲁帚状构造在晚侏罗-早白垩世出现雏型,始新世大致定型,渐新世为发育全盛期,晚第三纪仍有活动;随着时间的发展,该帚状构造各旋回层从收敛部位分别往撒开方向发育,在旋回层中的局部构造的发育和沉降中心也主要是沿同一方向迁移。油气主要分布在旋回层中部到撒开端,又以撒开部位较丰;在三大拗陷旋回层中,内旋层油气最富,位于收敛部位的东濮凹陷也有较丰富的油气(图1)。

冀鲁帚状构造的级序低于新华夏系,由南北向直扭应力在冀鲁地区的不平衡发育所导生,直接原因则是其东界郑庐断裂带的大规模平移带动鲁西砥柱与冀鲁沉降区发生相对扭动。郑庐断裂带在中生代左旋,鲁西砥柱相对顺时针扭动,雏型阶段的冀鲁帚状构造为张扭性;由于郑庐断裂带在新生代变为右旋,导致鲁西砥柱逆时针扭动,冀鲁帚状构造相应变为压扭性(图2)。冀鲁帚状构造是帚状构造应力场、新华夏系应力场和纬向构造应力场共同作用的产物,以帚状构造应力场影响最大。旋回层收敛部位及外旋层与新华夏系复合;撒开端与新华夏系联合。新生代以来,冀鲁帚状构造是冀鲁地区的主导性构造体系。

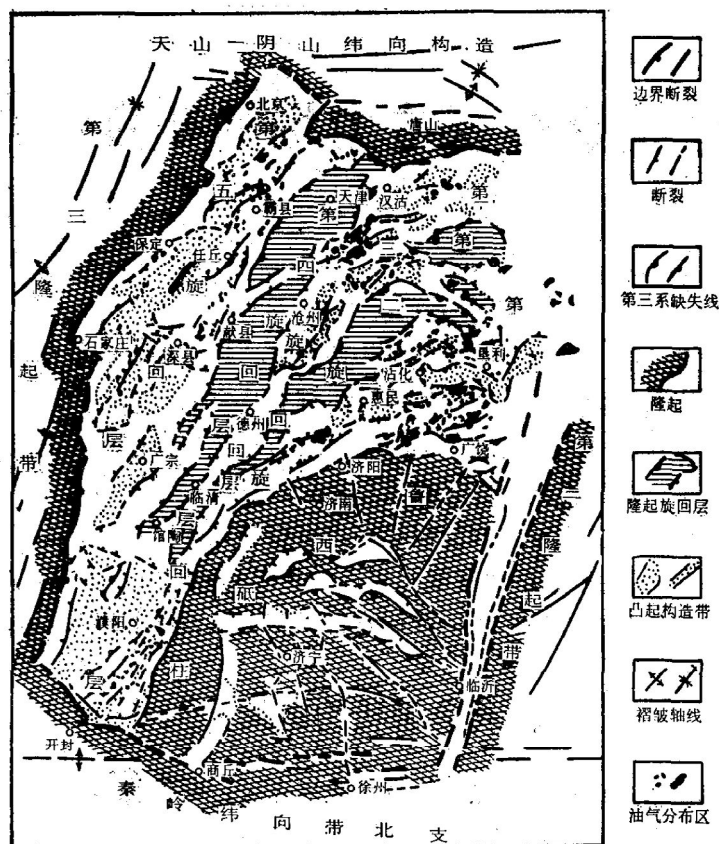


图1 冀鲁帚状构造及油气分布图

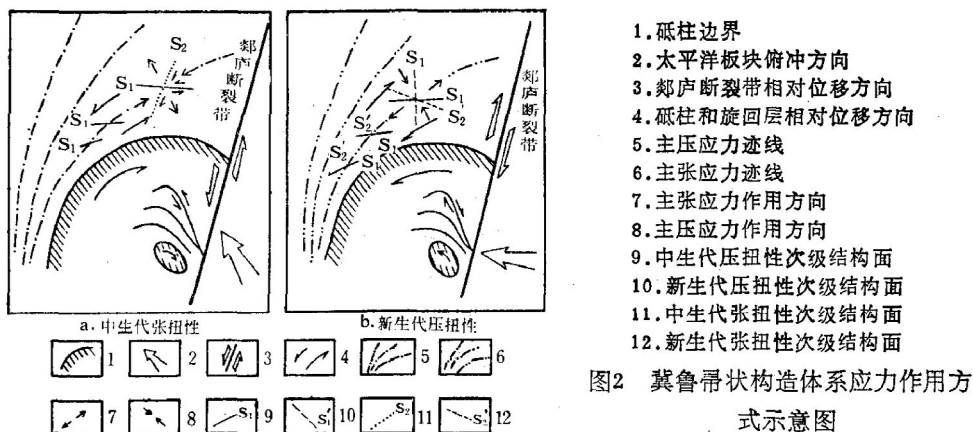


图2 冀鲁帚状构造体系应力作用方式示意图

二、冀鲁帚状构造应力场的模拟

有限元法是应用日广的数学方法,其基本思想是将所研究的连续体简化为由有限个单元组成的离散化模型,再应用计算机求出数值解答。弹性平面有限元法解决平面应力问题,首先把近似视为平面的连续体划分成有限个单元(常用三角形单元),先进行单元分析,建立单元刚度矩阵,由施加荷载后角点产生的位移求得单元内的应变,由应变求

应力,再由应力推算角点力;然后将各个单元组合,进行整体分析,包括四个主要步骤:

(1) 建立整体刚度矩阵;(2) 引入支承条件,得出位移法的基本方程;(3) 解方程组,求结点位移;(4) 根据结点位移求应力^[2]。由于有限元法可用于任意边界条件,且所研究的模型整体不一定要是理想的弹性体,因此在暂不考虑时间因素和塑性形变的条件下,可把冀鲁地块简化为逐段连续、在一定范围内均一的近似弹性体,以有限元法模拟其应力场。应用中国地质科学院地质力学研究所王连捷等编的弹性平面有限元程序,进行了两部分模拟:(1) 简化规则边界条件模拟;(2) 实际边界条件模拟,砥柱和旋回层中生代和新生代两期分别模拟。调整各项参数和边界加力方式,计算了17种方案。

(一) 模拟的简化条件

冀鲁地区范围达22万平方公里,地质构造极为复杂,在模拟其应力场的初步探索阶段,必须简化有关因素:

1. 将与冀鲁地区面积相等的球缺面积与其底面积相比,仅相差0.950平方公里,完全可将曲面简化为平面。

2. 冀鲁地区的长度(约600公里)和宽度(约360公里)比其厚度(中、新生代沉积一般厚8—10公里)大得多,可将三维的受力-应变过程简化为平面应变问题。

3. 冀鲁帚状构造主要由鲁西砥柱和旋回层发生相对扭动而产生,故可暂不考虑各边界断裂作用的分力,只考虑造成砥柱转动的合力。

4. 由于难以得知中、新生代实际作用的旋扭力大小,模拟中施加的外力取虚拟值。在初步探索阶段,只能得出应力场的相对变化趋势,可忽略所取虚拟值与实际作用力的差异。

上述简化在定性模拟的精度内是允许的,但必然使模拟结果与实际情况有差距。

(二) 模拟方案及具体步骤

确定正确的模拟方案,是应力场模拟首要的、最关键的一步。冀鲁帚状构造应力场模拟方案根据冀鲁地区的区域构造背景、实际地质条件和对其发育史及应力作用方式的研究确定。具体步骤为:

1. 确定边界条件并划分单元

冀鲁地区南端和北端被纬向构造带所限制,东侧和西侧以北北东向的边界大断裂为界。据此,选定模拟的边界条件为:

(1) 简化的冀鲁帚状构造规则边界 南界和北界为东西向的平行边界,东界和西界为北东 15° 的平行斜线,边界各点均双向约束。按实际比例,菱形地块的长宽比约为5:3,在其东南的砥柱部位,划出圆形的内边界,以此作为鲁西砥柱的加力边界。该方案的单元划分见图3,采用三角形单元,共划分387个单元,平均每单元代表516.8平方公里面积。

(2) 依实际地质条件所定的冀鲁帚状构造旋回层边界 按冀鲁地区实际边界轮廓确定边界形态。东界为郯庐断裂带,西界为太行山东麓断裂,北和南端分别被天山-阴山纬向带和秦岭纬向带北支限制,南东弧形边界为砥柱与旋回层交界的齐河-广饶断裂及聊城-兰考断裂。弧形边界为加力边界,其余边界各点均双向约束。在旋回层内,以埕宁隆起、沧县隆起和海中隆起的实际形态,分别按隆起和坳陷划分三角形单元。旋回层单

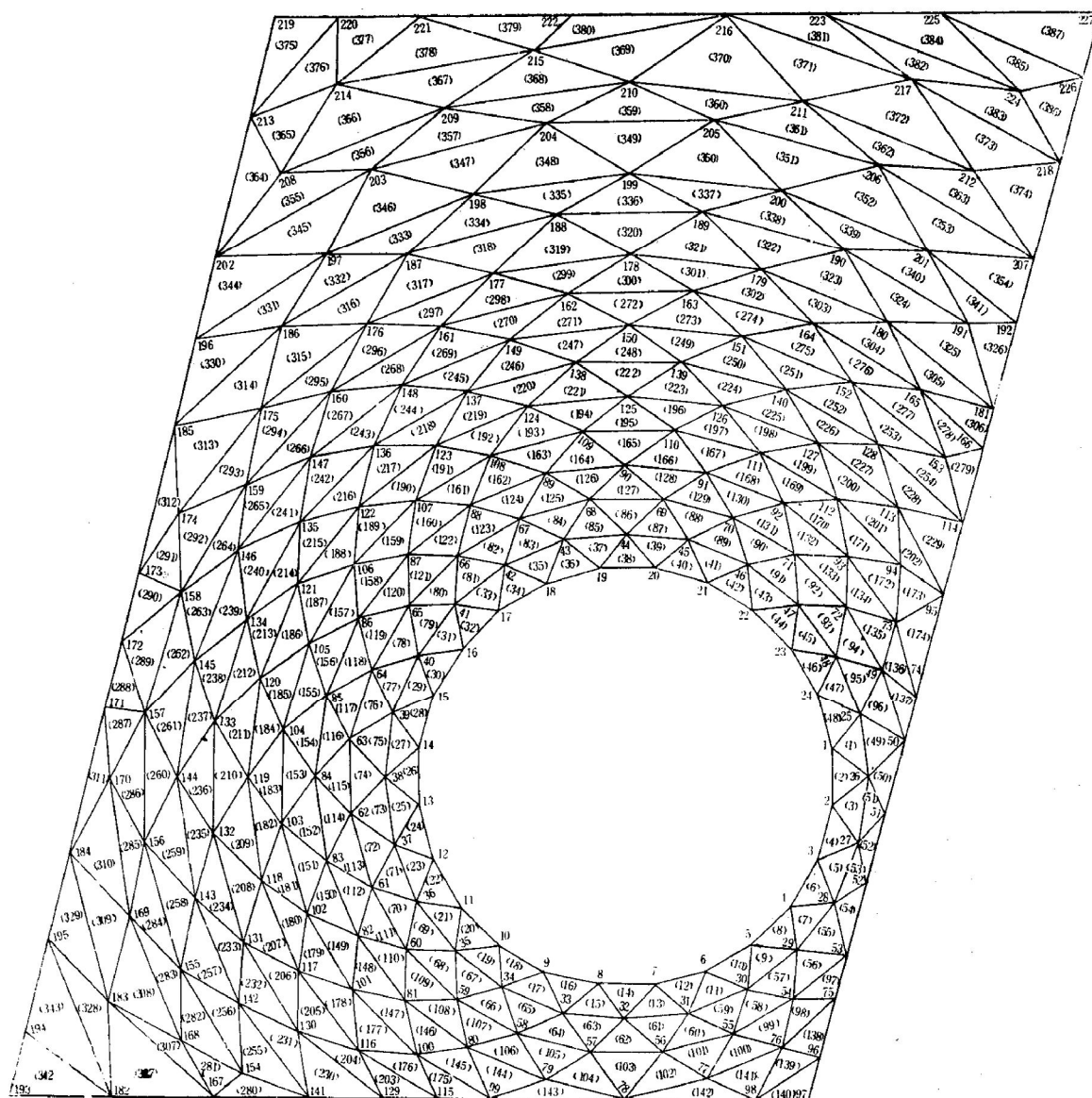


图3 规则边界一般扇状构造单元划分图

图中加括号为单元号，不加者为结点号

元划分见图4，共划分545个单元，平均每单元代表367平方公里面积。

2. 选择弹性参数

由于未取得冀鲁地区各时代地层的弹性参数测量值，模拟所用的弹性参数只能取虚拟值，基本依据是：

(1) 据对冀中坳陷马12井声波测井资料分析，第三系的岩层声速为2400—5400米/秒，纵横波速比为1.57—1.87。据此匡算，高声速致密地层的泊松比约为0.17，弹性模量约为 6×10^6 公斤/平方厘米；低声速砂泥质岩性段的泊松比为0.27—0.33，弹性模量为

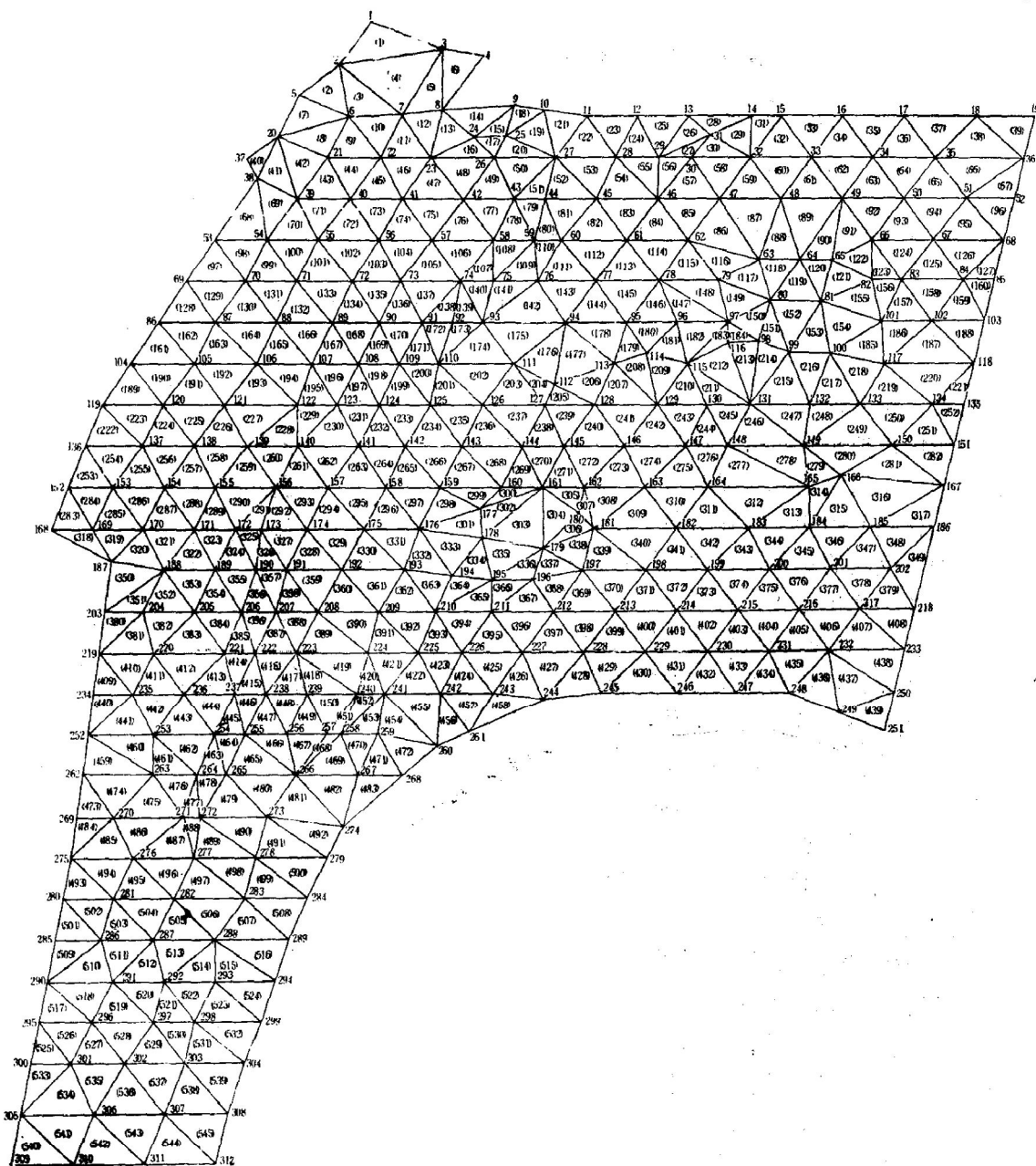


图4 冀鲁帚状构造旋回层单元划分图

图中加括号者为单元号, 不加者为结点号

$1 \times 10^6 - 3 \times 10^6$ 公斤/平方厘米。

(2) 拗陷旋回层的中、新生代地层以较疏松的砂泥岩为主, 隆起由相对致密、坚硬的前第三系各类岩石组成, 需分别赋值。

(3) 参考国内外常见岩石弹性参数的统计结果^[3], 韧性强、时代新的岩层泊松比较大, 弹性模量较小; 脆性大、时代老的岩层泊松比较小, 弹性模量较大。

据此, 选取几组弹性参数, 组成表1所示不同组合。

表1 应力场模拟弹性参数取值表

方案 参数	简化规则边界	实际边界旋回层				
		均质	非均质(1)		非均质(2)	
			坳陷	隆起	坳陷	隆起
泊松比	0.25	0.25	0.17	0.17	0.33	0.27
弹性模量 (kg/cm ²)	1×10^6	1×10^6	1×10^6	2×10^6 3×10^6 4×10^6	1×10^6	3×10^6

3. 确定加力方式

应变场模拟实验的结果表明, 帚状构造型式既可由图5a所示的模具(外旋主动)作出, 也可由笔者设计的模具(图5b, 内旋主动)作出。由旋回层沉积建造所反映的冀鲁帚状构造发育史显示了其内旋主动的应力作用方式, 有别于外旋主动的帚状构造(如潜江凹陷周矶帚状构造)发育特点。应变场模拟结果和冀鲁帚状构造发育史的研究表明, 其应力作用方式为鲁西砥柱内旋主动, 中生代和新生代运动反向。为简化计算, 体力(主要为重力)均取为1公斤/千克, 边界加力取100公斤/平方厘米的虚拟值。模拟的加力方式为: 中生代在简化模型的圆形内边界和实际模型的南东弧形边界施加顺时针旋扭力, 模拟中生代张扭性冀鲁帚状构造应力场; 新生代改顺时针旋扭力为逆时针旋扭力, 模拟新生代压扭性冀鲁帚状构造应力场。

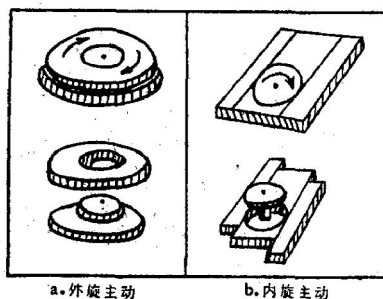


图5 旋扭构造泥巴试验模具

4. 基本计算过程

模拟方案确定后, 按计算要求整理好数据, 即用弹性平面有限元程序上计算机计算。基本计算过程为: (1) 输入数据和信息。(2) 建立总体刚度矩阵 $\{K\}$ 。(3) 三角分解总体刚度矩阵 $\{K\}$ 。(4) 解方程组 $\{\delta\} \{K\} = \{R\}$ 。式中 $\{\delta\}$ 为角点位移向量, $\{K\}$ 为总体刚度矩阵, $\{R\}$ 为结点位移向量。算出结点位移向量 $\{R\}$ 并输出。(5) 由方程组 $\{\sigma\} = \{S\} \{\delta\}$ 计算单元应力。式中 $\{\sigma\}$ 为单元应力向量, $\{\delta\}$ 为角点位移向量, $\{S\}$ 为二者的转换矩阵。输出单元应力向量 $\{\sigma\}$ 。

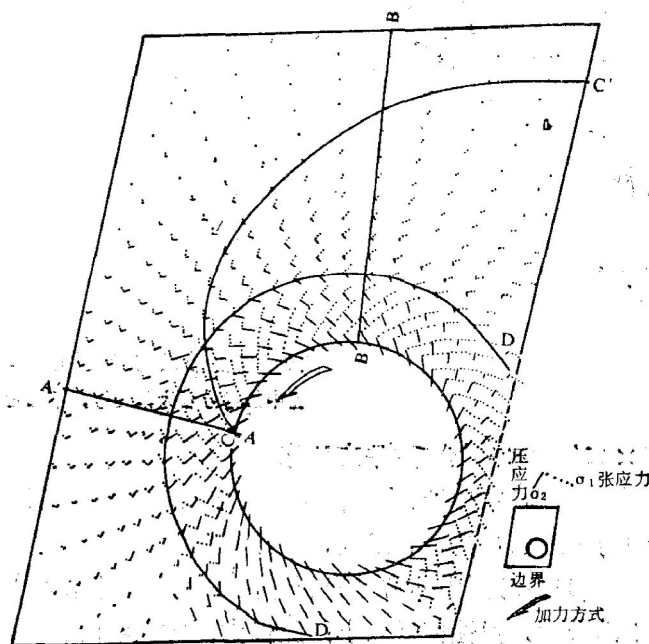


图6 规则边界一般帚状构造应力场模拟

5. 整理模拟计算结果

每一种模拟方案使用弹性平面有限元程序计算的结果,都给出了各单元 x 、 y 方向的应力值、结点位移值和主张应力值及其方向、主压应力值、最大剪应力值。按弹性力学的一般习惯,记主张应力为 σ_1 (正值),主压应力为 σ_2 (负值),最大剪应力为 $\tau_{\max}$ 。整理计算结果,把不同方案计算所得的各单元的 σ_1 、 σ_2 按其值大小和方向投在各单元的形心,便得到不同方案的应力场模拟图。按分析研究需要,还可利用计算机输出结果作其它图件。

三、冀鲁帚状构造模拟应力场特征

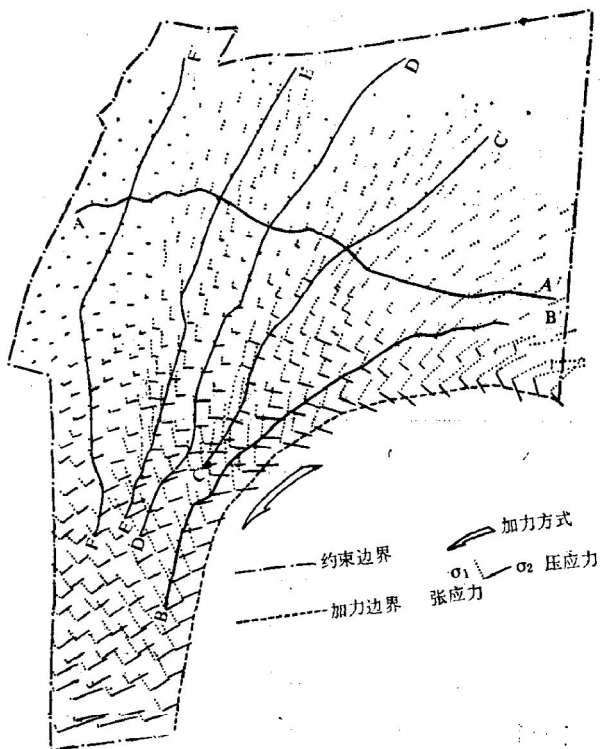


图7 冀鲁帚状构造旋回层应力场模拟

由于对冀鲁地区实际地质条件进行了大量简化,因此模拟结果只能给出冀鲁帚状构造应力场的相对变化趋势,是一种定性的模拟结果。

1. 冀鲁帚状构造模拟应力场为帚状

按各模拟方案计算整理而得的模拟应力场均为向南西收敛,向北东撒开的帚状(以图6、7为例)。主张应力 σ_1 迹线的收敛方向与所加旋扭力方向一致,即压扭性结构面的收敛方向与加力方向一致;而与主张应力相垂直的主压应力 σ_2 迹线的收敛方向与加力方向恰相反,即张扭性结构面与压扭性相反,其收敛方向与加力方向相反。这说明,冀鲁地区的帚状构造型式受其主应力迹线的展布型式控制,而该体系的力学性质则受其边界条件和旋扭应力作用方式的控制。

2. 模拟应力场的应力变化趋势

各方案主应力模拟值的相对变化趋势表明,冀鲁帚状构造的内旋层和收敛端,也即旋扭核心附近,是应力集中区。

(1) 沿半径方向,由内旋层到外旋层,主应力值以幂函数规律迅速下降。沿图6半径方向切剖面 $B-B'$,作图8,可见主应力模拟值随半径的加大以 $y=B \cdot x^A$ 的幂函数形式迅速减小。由图7可见,从旋回层中部到撒开端,从内旋层到外旋层,主应力值均迅速下降。内旋层济阳凹陷 σ_1 最小值是57.80,

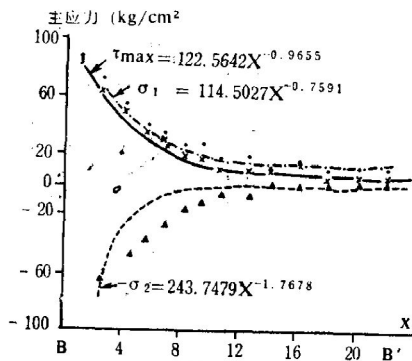


图8 沿半径方向主应力变化
($B-B'$ 剖面)

外旋层冀中坳陷最大值才是50.35。由砥柱向外,济阳、黄骅、冀中三大坳陷旋回层的 σ_1 、 $|\sigma_2|$ 、 $\tau_{\max}$ 平均值依次下降(表2),说明从坳陷内旋层到外旋层,旋扭应力由强变弱,是济阳坳陷次级旋扭构造发育、黄骅坳陷有次级旋扭构造但较少、冀中坳陷仅次级直扭构造发育(该地区复合了新华夏系直扭应力场)的原因之一;还可解释在地质条件相近的东营地区和大港地区,发生油气初次运移的泥岩压实突变阶段出现的深度范围不同(东营地区在2100—2700米,地温为90—110℃;大港地区在2700—3200米,地温为106—130℃),是因为旋扭应力和地静压力共同控制不同深度的泥岩压实程度,在同一时期,地静压力相同的条件下,旋扭应力相对集中的内旋层达到压实突变阶段所需的地静压力比中旋层相对要小,造成内旋层发生初次运移的深度范围浅于中旋层。

表2 各旋回层剖面模拟应力变化表

旋回层 应力值		冀中坳陷	沧县隆起	黄骅坳陷	埕宁隆起	济阳坳陷
σ_1	最大	50.35	112.45	82.51	145.02	117.02
	最小	0.41	37.03	15.04	21.53	57.80
	平均	14.41	66.03	34.57	68.89	80.96
$ \sigma_2 $	最大	65.29	101.17	73.61	70.27	92.57
	最小	1.31	1.85	1.15	2.70	8.98
	平均	26.83	30.58	31.04	24.00	51.55
$\tau_{\max}$	最大	56.21	91.89	74.04	102.41	96.27
	最小	2.28	15.04	8.30	7.84	26.19
	平均	20.33	47.52	32.28	48.14	65.82

(2) 沿旋回层方向,由收敛端到散开端,主应力值亦以幂函数规律迅速下降。沿图6旋回层方向剖面C—C',亦可见主应力模拟值随距收敛端距离的加大而迅速减小(图9),其函数关系式(见图9)的形式亦为 $y=B \cdot x^A$ 的幂函数形式。沿图7各一级旋回层轴线剖面,主应力值变化曲线特征与图9相仿,模拟主应力值下降最剧烈的部位是旋回层由收敛端到散开端的2/5处,其余部位则较平缓。

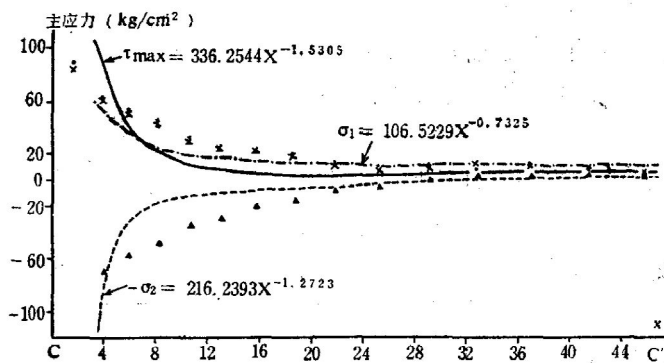


图9 收敛端到散开端主应力变化(C—C'剖面)

3. 岩石力学性质的差异导致不同的应力分布趋势

应力场模拟所采用的弹性参数,一类是把冀鲁沉降区简化为均质体,取单一参数值;另一类视为非均质体,按隆起和坳陷取不同弹性参数,表征不同岩石力学性质。两类方案的模拟结果,共同特点是从内旋层到外旋层、由收敛端到撒开端,主应力值迅速下降。但取单一弹性参数的方案所得结果,由内旋层到外旋层,各主应力值单调下降;而取不同弹性参数所得的结果,由内旋层向外,主应力值起伏下降。坳陷带和隆起带弹性参数差异越大,也即岩石力学性质差异越大,主应力值的起伏就越大。例如图7,隆起上泊松比取为0.27,弹性模量取为 3×10^6 公斤/平方厘米;坳陷中泊松比取为0.33,弹性模量取为 1×10^6 公斤/平方厘米。由图7可见,隆起上的主应力模拟值显然大于相邻坳陷。这说明,在同一方式的地应力作用下,不同的岩石力学性质会导致不同的应力分布趋势。在岩石力学性质有明显差异的冀鲁地区,可能会导致不同特征的变形。

4. 应力传递方式及特定边界条件对模拟应力场的影响

横穿图7五个一级旋回层剖面A—A',作主应力模拟值变化曲线(图10),不仅可见由砥柱向外该曲线的起伏下降特征,而且可见在隆起部位出现的主应力波峰为东陡西缓的不对称形态,恰巧应力值变化小的缓坡对应坳陷与隆起的超覆接触,应力值变化大的

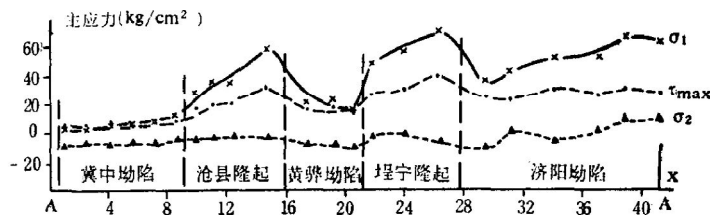


图10 A—A'剖面主应力变化

陡坡对应其断层接触。另外,由砥柱向外, σ_1 的下降幅度大于 $|\sigma_2|$ 的下降幅度,导致三大坳陷旋回层二者平均值之比由砥柱向外下降:济阳坳陷 $\bar{\sigma}_1/|\bar{\sigma}_2|=1.57$,主张应力大于主压应力;黄骅坳陷 $\bar{\sigma}_1/|\bar{\sigma}_2|=1.11$,二者相近;冀中坳陷 $\bar{\sigma}_1/|\bar{\sigma}_2|=0.53$,主压应力大于主张应力。由于隆起和坳陷各取其弹性参数,分别作为均匀介质处理,施加的又是简单的逆时针旋扭力,因此由砥柱向外隆起上主应力波峰的不对称变化和各坳陷主张应力与主压应力之比的差异,只能是地应力由砥柱向外传递的方式和旋回层边界条件限制两方面因素造成的。这说明三大坳陷旋回层的地质结构及各自的建造和改造特征的形成,不仅因为有由砥柱向外旋扭应力的减弱,有新华夏系应力场的复合作用,还因为冀鲁帚状构造展布地区本身边界条件和岩石力学性质不同所造成的上述应力变化趋势的差异。

5. 冀鲁帚状构造不是单一方式旋扭应力作用的结果

以冀鲁帚状构造的实际应变图象(图1)与模拟应力场(图7)相比较,二者都是向东北撒开、向南西收敛的帚状型式, σ_1 迹线的展布与实际旋回层的展布基本一致。沿同一旋回层轴线 σ_1 迹线都是弧形,以内旋层曲率最大,与应变图象近砥柱曲率大的特点一致。说明帚状构造应力场确是控制冀鲁地区帚状构造型式的主要因素。但在旋回层的收敛部位,即临清坳陷, σ_1 迹线向砥柱收拢,基本为北西向,而图1中五个旋回层延伸进临清坳陷后,构造线实际呈北北东向展布;冀中坳陷的模拟应力值已比其余旋回层小得多,

旋扭应力场作用相对薄弱,不能与冀中坳陷实际构造所反映的应力作用强度相对应;沿埕宁隆起和海中隆起一线, σ_1 的方向连续变化,不能对应埕宁隆起走向由北东陡转为北西的实际形态。这是采取既将实际地质条件大大简化,又只考虑新生代逆时针旋扭的单一加力方式的简化模拟方案所致,从反面证明,冀鲁帚状构造的今构造面貌是多期不同方式应力共同作用的结果。

四 对应力场模拟结果的检验

3.若已知一定的改造特征和某种矿产分布规律与一定的应力场之间的对应关系,则模拟应力场应与所模拟地区改造特征、矿产分布规律所反映的应力场一致。据对冀鲁帚状构造控油特征的研究,冀鲁沉降区的圈闭发育程度所反映的旋回层不同部位应力作用强度与模拟应力场能互相对应,内旋层与中旋层油气初次运移出现的深度范围不同也能与模拟应力场对应。由于地应力的控油规律尚需探索,目前难以来全面检验应力场模拟的效果。

从以上三方面检验,以定性的初步模拟精度要求,冀鲁帚状构造应力场模拟取得了一定成效,对实际应力场的研究提供了信息。

构造模拟是研究构造的重要手段之一。应变场模拟可在短时间内得到应力作用方式和应变图象之间的关系,数学模拟则能得到特定应力作用方式、特定边界条件的构造应力场。有限元法是应力场模拟的有效方法,值得今后进一步探索,借以研究各种类型的构造应力场。本文对冀鲁帚状构造应力场的数学模拟只是初步探索,有待今后进一步改进。

限于篇幅,冀鲁帚状构造应力场对油气的控制作用将另撰专文讨论,本文不予介绍。

(收稿日期 1982年5月13日)

参 考 文 献

- [1] 刘泽容等, 1979, 再论冀鲁帚状构造体系. 华东石油学院学报, 第2期.
- [2] 龙驭球, 1978, 有限元法概论. 人民教育出版社.
- [3] 黄绪德, 1981, 建立和发展岩性地震勘探法. 地球物理学报, 第24卷, 第2期.

PRELIMINARY MATHEMATICAL SIMULATION OF HEBEI-SHANDONG BRUSH-STRUCTURAL STRESS FIELD

Liu Zerong Chu Zehan

(*Exploration Department, Huadong College of Petroleum*)

Wang Xiaoling

(*Beijing Institute of Petroleum Exploration and Development*)

Abstract

The problem how to apply a finite element method of elastic plane to simulate the stress field of Hebei-Shandong brush structure is discussed here. The structure, formed in Late Mesozoic, is a gigantic tectonic system seated in the second subsidence belt of Neocathaysian system, with its pillar of stress being western Shandong uplift, and the rock slice between two rotation surfaces being Hebei-Shandong subsiding area. The tectonic system is resulted from the relative shear movement of the pillar and the rock slice said above, both pushed by famous Tancheng-Lujiang fault belt in the east. Ever since its formation, the system has controlled the geological structure as well as oil distribution in the region where it stretched to. Have studied the history of structural evolution in this region, the authors consider that the system was formed under the effects of driving stress inside rotation layer. Two simulation programs related to the system were described, one is simplified regular boundary program, the other is actual boundary program. 17 simulations were carried out by methods of adjusting boundary conditions and elastic parameters. The results of the stress field simulation show that loci of the driving stress was a brush-shape, the neighbourhood of the pillar (i.e. the inside rotation layer and the converging part) is the place where stress concentrated. It is also shown clearly that the simulating value of the driving stress decreases rapidly and exponentially along radial direction and from the converging part to the diverging part. The reduction amplitude of tensile stress is larger than that of compressive stress, and the stress value on uplift is higher than that of adjacent depression. The properties of the simulated stress field are basically agreed with the strain pattern of Tancheng-Lujiang brush structure, thus some of geological phenomena can be explained, whereas their disagreements show from the opposite side that Hebei-Shandong brush structure is really resulted from multistage tectonic stress fields of different modes.