



川东卧龙河构造形成机制与 裂缝分布规律的定量研究

赵从俊* 张 健 沈 浩 马健勇 田晓燕

(四川石油管理局地质勘探开发研究院)

内容提要 本文据相似理论和方法,通过力学模拟实验,首次应用三维有限元法并综合钻探资料及地震成果,深入探讨了川东卧龙河构造形成机制、应力分布和裂缝发育规律及其与气藏富集的关系。研究结果与勘探实际吻合较好,为在该构造优选井位提供了有力的依据。

主题词 四川东部卧龙河构造 相似 理论 模拟实验 三维分析 岩石力学 构造 形成 构造应力 裂缝(岩石) 分布 气藏

卧龙河构造系四川盆地东部万县弧褶带西南端宽向斜中的一个圈闭完好的北北东向构造(图1)。

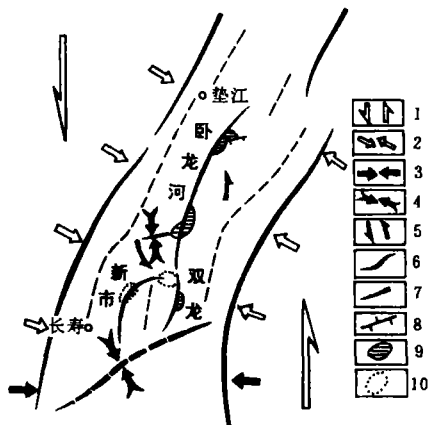


图1 卧龙河、双龙、新市地区受力方式

1. 区域水平扭应力; 2. 北北东、北东向压应力;
3. 南北向构造压应力; 4. 北东向构造压应力; 5. 水平旋扭应力; 6. “S”形构造; 7. 复合弧构造; 8. 断层;
9. 构造凸侧裂缝发育区; 10. 多组构造复合形成的油气有利区

地表构造呈不对称的箱状形态(西陡东缓),由侏罗系自流井群及重庆群组成。褶皱卷入深度逾6000m;地腹由中三叠统组成似箱状形态,断褶发育;二叠系阳新统形成西陡东缓之膝褶构造,断层发育于陡翼并切向轴部,故垂向构造表现出不协调变异之特点。

由于上述构造位于川东褶皱带3个三级构造体系的接壤地带,故构造的形变明显受到边界条件和区域应力场的控制,从而使形变复杂化:既出现卧西(断下盘)北东东向构造,又表现有南北向的构造形迹,导致构造轴向呈向北西—北西西凸出之弓形,并与南边的双龙构造组成一明显的“S”形构造带,控制了阳新统构造裂缝的发育和天然气的富集。

模拟实验是以相似理论为基础来研究地质实体的一种有效方法。原理是将实验模型和实际地质构造各自当作一独立的单元,如果两单元相似,则其中一单元的各类参数可通过将另一单元的相应参数乘以一定换算系数的方式求得。不同性质的材料,换算系数不

* 610051,四川省成都市府青路一段1号。

同,但同类材料的参数,换算系数应为一个不变的数值,即相似比例系数 C 。相似时,就可认为实验现象与实际物体相似(C 为相似比例系数, e 为不同的材料)。

例如岩石密度相似比例系数 C_ρ 可由下式求得:

$$C_\rho = \rho' / \rho$$

式中 ρ' —— 模型材料密度;

ρ —— 实际岩石的密度。

据此方法可求取抗压强度相似比例系数 $C_p = p' / p$ 以及弹性模量相似比例系数 $C_E = E' / E$ 等。

据笔者 1984、1986 年对四川盆地沉积盖层岩性组合及岩石力学研究成果数据资料,综合表 1 实验材料力学参数,进而获得了卧龙河构造力学实验过程中各类不同材料的相似比例系数值(表 2)。

表 1 模型实验材料力学参数表

材料组号	材料名称	混合比例 (%)	材料密度 (g/cm ³)	抗压强度 (10 ⁵ Pa)	弹性模量 (10 ⁵ Pa)	泊松系数 μ	抗剪强度 (10 ⁵ Pa)	内摩擦角 φ
6	凡士林	50	0.93	0.11	4.39	0.18	0.10	5°
	橡皮泥	50						
5	石 蜡	25	0.87	0.16	9.59	0.11	0.11	9.5°
	凡士林	75						
4	橡皮泥	100	1.01	0.53	29.18	0.22	0.45	7.7°
3	石 蜡	50	0.89	2.33	187.76	0.26	0.97	15°
	凡士林	50						
2	石 蜡	50	0.98	2.70	165.3	0.27	1.33	25°
	橡皮泥	50						
1	石 蜡	100	0.88	10.01	745.92	0.30	1.79	52.5°

表 2 卧龙河构造模拟实验材料性质相似条件表

相似内容	符号	原 型	模 型	比例常数值
抗压强度相似比例	C_p	硬层: $(1261 \sim 2498) \times 10^5 \text{Pa}$ 中硬: $(751 \sim 1898) \times 10^5 \text{Pa}$ 软层: $(200 \sim 700) \times 10^5 \text{Pa}$	硬层: $2.33 \times 10^5 \text{Pa}$ 中硬: $0.16 \times 10^5 \text{Pa}$ 软层: $(0.01 \sim 0.1) \times 10^5 \text{Pa}$	硬层: $(8 \sim 18) \times 10^{-5}$ 中硬: $(2 \sim 20) \times 10^{-5}$ 软层: $10^{-4} \sim 10^{-5}$
弹性模量相似比例	C_E	硬层: $91.7 \times 10^5 \text{Pa}$ 中硬: $(76.4 \sim 84) \times 10^5 \text{Pa}$ 软层: $(3 \sim 8) \times 10^5 \text{Pa}$	硬层: $187.76 \times 10^5 \text{Pa}$ 中硬: $9.59 \times 10^5 \text{Pa}$ 软层: $< 4 \times 10^5 \text{Pa}$	硬层: 2×10^{-5} 中硬: $(1.1 \sim 1.2) \times 10^{-5}$ 软层: $(5 \sim 10) \times 10^{-5}$
泊松系数相似比例	C_μ	硬层: 0.37 中硬: 0.33 ~ 0.36 软层: 0.2 ~ 0.3	硬层: 0.30 中硬: 0.26 软层: 0.1 ~ 0.18	硬层: 0.9 中硬: 0.70 ~ 0.8 软层: 0.5 ~ 0.6
比重相似比例	C_ρ	硬层: $2.72 \sim 2.82 \text{g/cm}^3$ 中硬: 2.7 软层: $1.62 \sim 2.64 \text{g/cm}^3$	硬层: } 中硬: } $0.88 \sim 1.01 \text{g/cm}^3$ 软层: }	$0.2 \sim 0.3$ $0.04 \sim 0.07$
粘度相似比例	C_η	中硬: $(0.2 \sim 3) \times 10^{15} \text{P}^{(1)}$ 软层: $(0.06 \sim 2.4) \times 10^{15} \text{P}$	$10^2 \sim 10^3 \text{P}$	
时间相似比例	C_t	1 ~ 100 万年	1 ~ 10 min	$10^{-8} \sim 10^{-10}$
重力加速度相似比例	C_g	980 cm/s ²	980 cm/s ²	

1): 1P = 0.1 Pa · s。

卧龙河构造裂缝的定量研究

1. 基础实验

为提高力学实验质量、变以往定性认识为定量研究,利用圆形变产生的形态、面积(包括长、短轴)变化,定量研究破裂形成特点及其分布规律是一条有效途径。通常,应力作用方式不同,圆形变特点及其展布亦不相同。

(1) 纵应变条件下圆形变特点

对纵应变条件下的圆形变的定性认识,早已反映在一些知名学者的著作中。图2为粘土材料在水平压缩条件下的变形。随弯曲褶皱的形成和发展,圆产生形变。褶皱顶部外弧部位呈拉张状态,圆形变为椭圆状,椭圆长轴呈水平展布并与压应力方向一致;褶皱内弧(中性面以下)呈挤压状态,椭圆长轴为直立展布并与压应力方向相垂直(B)。平面形变上反映(A),背斜与向斜间大致存在类似剖面上的平面中性地带,在此地带长、短轴趋于相等,说明拉张应变和压缩应变处于平衡状态,圆形变微弱,为张性破裂不发育地带。

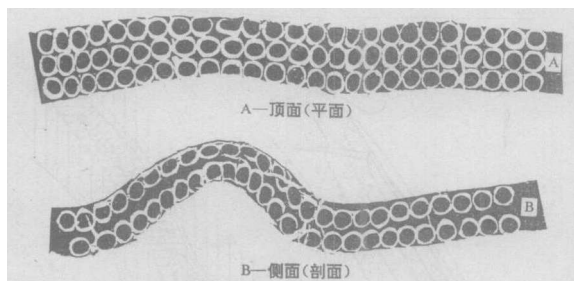


图2 粘土层在纵弯曲下的圆形变拓展图
(顶面为俯视图)

(2) 扭应变条件下圆形变特点

扭应变是指剪切应力条件下的圆形变(图3)。图3中1、2、3、4分别为主要扭应力、派生压应力、引张应力和局部扭应力;A、B分别为未变形圆及变形后椭圆的应力分析;C为粘土层在扭应力作用产生的圆形变及张性破裂特点。主要形成一系列斜列椭圆和雁行

状张扭性裂缝。张扭性裂缝与派生压应力方向相一致,与椭圆长轴略相垂直。

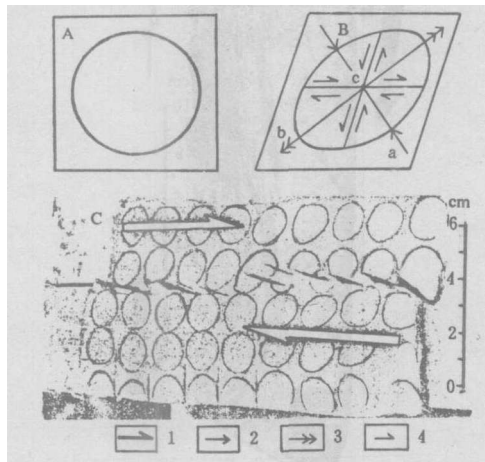


图3 扭应力作用圆形变特征图

A. 未形变的圆; B. 变形椭圆应力分析; C. 粘土材料模拟试验

1. 区域扭应力; 2. 压应力方向; 3. 引张应力方向; 4. 局部扭应力

a. 最大主应力轴; b. 最小主应力轴; c. 中间主应力轴

2. 卧龙河构造力学模拟实验

力学模拟实验的目的是在满足一定的相似条件下通过实验手段重现构造应力场和形变场,定量研究破裂的发育状况及其分布规律,进而指导钻探部署。据相似理论和方法,结合岩石力学实验,对卧龙河构造进行模拟实验,获得了二维及三维构造破裂特征及其分布规律。

(1) 构造形成机制

在川东区域构造背景及构造应力场条件下,重现卧龙河扭动构造主要受力条件及其形变、破裂特征规律,关键在于选择适宜材料(包括材料厚薄),使其形变过程中既易形成褶皱、又能直观表现出破裂特点。图4中形成的三个高点均呈雁行状展布,显示逆时针扭动。沿高点轴部及模型边部发育一组与压应力方向平行的张扭性破裂,呈北西—南东向。

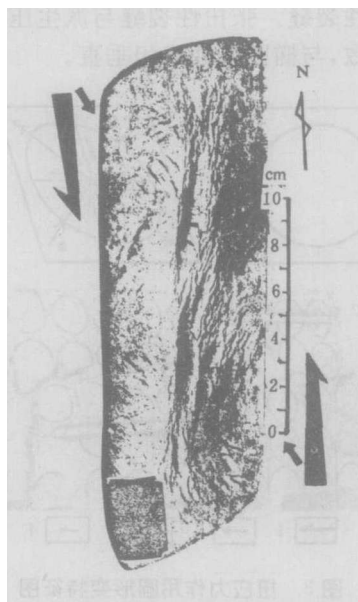


图4 北北东向构造机理模式

(2) 二维(剖面)构造发展特征

对卧龙河构造作二维形变实验,选择不透明的石蜡和橡皮泥混合(各50%),形成明显的褶皱和断裂。实验结果,获得与卧龙河膝褶构造极为相似的效果。构造形变发展概括为三个阶段,见图5。

(3) 三维(立体)构造破裂特征

三维构造力学模拟实验较之二维更复杂,难度亦更大,不仅要满足合理的边界条件及受力条件,还必须选择具一定脆性破裂又有塑性形变特点的材料。实验结果表明,再现的构造形态与实际构造吻合较好(图6A)。据立体构造实验模型,通过各圆形变点恢复的 $\Delta S'$ 形变场,明显地将卧龙河构造分为三段、数块高、中、低值破裂分布区(图6B)。

高值区:位于构造南北两段。北段在卧91—卧127井一带,南段在卧77—卧93井一带。 $\Delta S'$ 值为0~0.5。高值区反映为圆面积的扩张区,a、b轴沿水平方向处于拉张状态,为纵、横张裂缝发育区,控制了卧67井及卧127井两大裂缝系统的分布,并控制了卧龙河构造阳新统探明可采储量的95.7%(表3)。

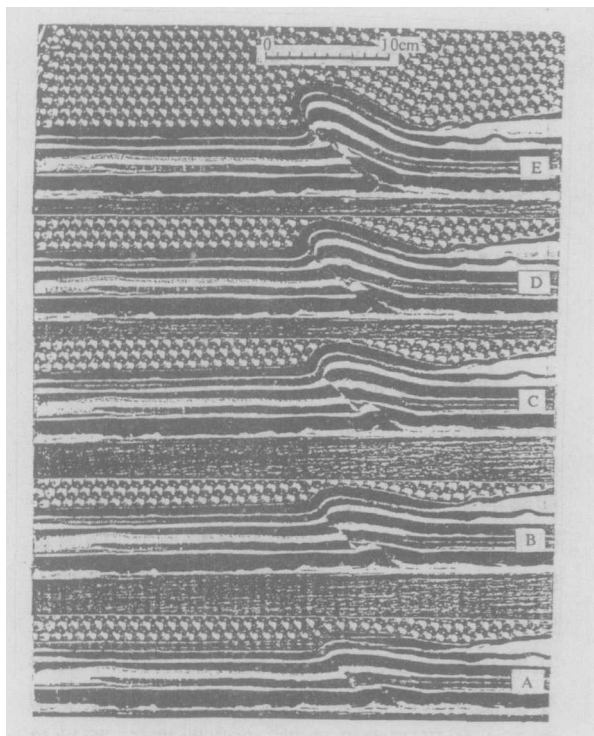


图5 卧龙河构造形变发展特征

A·褶皱初始与断裂形成阶段;B、C 形变中期断褶活动阶段;D、E 晚期断层加剧活动阶段

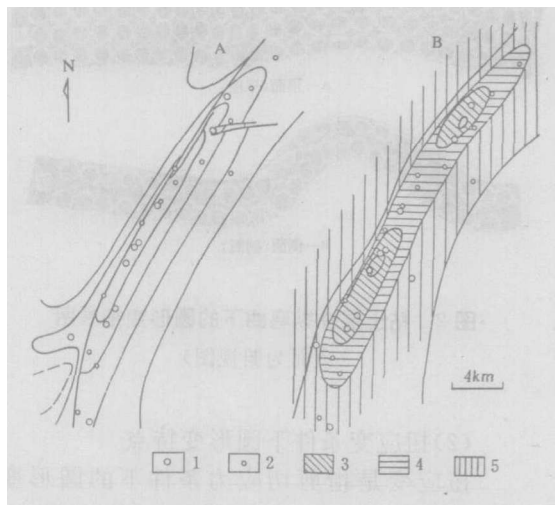


图6 卧龙河构造模拟试验破裂分区图

A. 阳新统顶面构造等高线图;B. 形变场 $\Delta S'$ 值破裂分区图;1. 工业气井;2. 微气井或干井;3. 张性破裂高值区;4. 张性破裂中值区;5. 张性破裂低值区

表3 卧龙河构造力学模拟破裂分区对比表

内 容	符 号	高值区	中值区	低值区
圆面积常量	$\Delta S'$	>0	$-0.5 \sim 0$	<-0.5
测试井数	(口)	8	11	4
获气井数	(口)	7	1	1
获气井率	(%)	87.5	9	25
探明储量	(%)	95.7	4.3	0

中值区:位于构造中段及南北段高值区的外围地带,张性裂缝组系分布不均一。除卧47井钻获4亿 m^3 气储量外,其余的10口阳新统探井均未获工业气流,说明此区张破裂不发育,难以形成大的裂缝连通系统。

低值区:主要分布于构造翼部和向斜区。该区岩层多处压缩状态,圆面积相应变小,不利于产生张裂缝。主要发育一系列压性、压扭性构造形迹,故勘探成功率低,除卧115井钻遇岩溶获气流外,其余探井均未获工业气流。

卧龙河构造三维有限元 应力场模式

有限元法是一种用以分析力学问题的数值解法,基本原理是将连续的复杂物体的计算人为地转化为形式简单的有限个单元的分析,然后再将各单元组合起来成为一总的组合体。其构思可表达为:物体离散化→单元分析→单元综合。

单元综合是在单元分析基础上建立微分方程,给出地质模型的力学参数,并在 Hitich 计算机上利用 Sap6 程序实现卧龙河阳新统构造应力场及形变场。

据牛顿流体的流变原理,将阳新统视作粘滞性体,故在方法上用与推导弹性薄板挠度偏微分方程相似的步骤推导出粘滞性薄板应满足的偏微分方程,并考虑中面力引起的弯曲作用,将弯曲应力与中面应力叠加而求

得褶皱中任一点的构造应力(σ)。

在构造应力场研究中,考虑了静岩压力 σ_r 及流体压力 σ_f 对卧龙河构造阳新统顶部和底部应力分布的影响,即总地应力 $\sigma_e = \sigma + \sigma_r + \sigma_f$ 。

据有限元法计算卧龙河构造形变场,结果与力学模型反映的破裂发育、分布规律高度吻合。

阳顶构造最大主应力分布趋势与阳顶构造等高线轮廓大体相似,反映了卧龙河构造的基本形态特点。总的表现了背斜正应力值、向斜负应力值分布特征,在构造顶部最大主应力达最高值($10 \times 10^7 \sim 18 \times 10^7 \text{Pa}$)。西翼主断层下盘向斜区为最大负值区($-7 \times 10^7 \sim 18 \times 10^7 \text{Pa}$),故在主断层分布地带形成剧烈的应力梯度变化带。

最小主应力分布与最大主应力有显著的差别,构造顶部虽处正值区,但应力值大为减弱。主断层下盘向斜部位最小主应力最低值达 $-90 \times 10^7 \text{Pa}$;东部向斜区为 $-10 \times 10^7 \text{Pa}$ 。沿构造轴部及东缓翼最小主应力分布的主要特点是形成几块高低值相间的破裂区。高值区位于构造南、北两段,正处于67井及127井两大裂缝系统分布区,最小主应力值为 $1 \times 10^7 \sim 9 \times 10^7 \text{Pa}$;低值区包括主构造中段及其端部,最小主应力值 $<1 \times 10^7 \text{Pa}$,最低达 $-10 \times 10^7 \text{Pa}$ 。

阳新统底部最大、最小主应力分布及应力值大小与阳顶大同小异,大体反映了石炭系构造顶部之特点。由于卧龙河构造阳新统储集层普遍存在高压异常,据23口钻井动态数据分析求取平均压力系数为1.63,孔隙流体密度为 1g/cm^3 。

根据静岩压力(σ_r)等于岩石密度、重力加速度及埋藏深度之乘积,即 $\sigma_r = \rho_r \cdot g \cdot z$,求得阳新统顶、底部的正常流体压力,结合阳

新统实测内摩擦角 φ ,内聚力 S_0 及内摩擦系数 μ 值求出在 σ_3 轴上的截距 C_0 及 σ_1 与 σ_2 之比值 q ,以及埋藏深度条件 Z 值。进一步获得阳新统顶、底部之静岩压力与围压,并在此基础上探讨阳新统岩体的破裂准则,进一步对卧龙河构造阳新统破裂的发育、分布特征及力学性质与油气富集关系进行评价。

构造南北两段卧67井及卧127井一带为 $\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0$ 破裂分布区。此时围压 p 处于最小主应力状态,故阳顶构造沿水平方向呈现双向拉张,为纵、横张破裂的形成创造了极为有利的应力场条件,且张破裂的体积趋于膨胀,并减少了孔隙流体所承受的压应力,导致地层压力梯度变化,有利于高压区的烃类和孔隙流体向张性破裂发育区运移,形成最佳的气藏富集区。

构造中段及南、北倾没端部,由于 $\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$,围压 p 成为中间应力,原平面应力 σ_2 成为最小主应力,故有利形成垂直层面扭破裂及部分张破裂,但张破裂组系搭配欠佳,往往出现一组且分布不稳定,发育程度差于构造南段张破裂区。

构造两侧向斜部位,因静岩压力和流体压力的增大,围压 p 转变为最大主应力,使岩层处于三向受压状态,往往导致剖面共轭扭破裂的形成,发育的扭破裂空间体积较小,并处于闭合状态,大大降低了烃类和流体的储集和运移能力,形成不利气藏富集的双低应力分布区。

最大、最小主应力高值区形成之双高应力场背景不位于构造中段曲率最大部位而在构造南、北段多组构造干扰复合部位,说明构造复合部位应力比较集中,产生破裂条件极为有利,并控制卧龙河阳新统两大裂缝系统的形成,探明可采储量高达95.7%(表4)。

表4 卧龙河构造阳新统数学模拟分区钻探效果

内 容	双高压	高中区	低中区	双低区
最大主应力(Pa)	$>7 \times 10^7$	$>7 \times 10^7$	$>7 \times 10^7$	$>7 \times 10^7$
最小主应力(Pa)	$>3 \times 10^7$	$0 \sim 3 \times 10^7$	$0 \sim 3 \times 10^7$	<0
测试井数(口)	6	11	3	3
获气井数(口)	5	3	1	0
获气井率(%)	83.3	27.3	33.3	0
探明地质储量(%)	95.7	4.3	0	0

根据与卧龙河构造极为相似的天然小型构造破裂统计分析研究结果,反映以下特征:①膝褶构造断层上盘裂缝发育优于下盘,突出特点是上盘构造张性裂缝空间体积大于下盘,纵、横张裂缝面裂缝率高达1.147%,下盘仅0.102%,上盘较下盘高出一个量级以上(表5);②从裂缝组系分布及发育情况分析:上盘纵张缝较下盘发育,下盘横张缝发育密度高于上盘并发育一对共轭扭裂缝。

表5 与卧龙河构造相似的小构造裂缝发育程度表

项 目		断 层 上 盘			断层下盘拱体		
		总值	纵张缝	横张缝	总值	纵张缝	横张缝
线密度	(n/m)	6.8	4.5	2.3	6.07	1.37	4.70
面密度	(n/m ²)	1.979	0.703	1.276	2.035	0.285	1.750
体密度	(n/m ³)	0.201	0.002	0.199	0.11	0.05	0.06
面裂缝率	(%)	1.147	1.09	0.057	0.102	0.085	0.017

注:下盘尚出现一套晚期共轭扭裂缝(共2条)。

上述两特点与力学模拟破裂模式及有限元应力场破裂分布模式具有高度的吻合性。说明断层上盘拱体沿水平方向处于双向拉张,有利于促进张裂缝的发育,特别是纵张缝空间体积增大。断下盘拱体由于静岩压力增大,岩体处于压缩状态,尽管伴生拱曲发育横张缝,但张裂缝有效的空间体积相对减小。此外,晚期共轭扭裂缝分布于下盘,进一步说明了下盘承受了剧烈的水平挤压的结果。

构造应力场与
气藏富集关系探讨

据卧龙河构造力学模拟实验及三维有限元构造形变场及应力场研究,在综合勘探成果及小型构造素材基础上,获得了构造裂缝的分布规律且明显反映出破裂分区特征与气藏富集的关系。

1. 卧北区

位于构造的北段及其倾没端部,为北北东向主干断裂与北东东向断裂夹持下形成的三角地带。反映该区构造复合及受力较为复

杂并控制了阳底构造北高点的形成。

(1)力学模拟实验为形变高值区,三维有限元应力场为双高一高低应力分布区,两者仅范围略有差异,反映该区纵、横张裂缝发育之特点。

(2)处于构造北端轴线弯曲之凸侧部位,有利于产生横张缝。卧127井正位于构造北端凸侧。钻进过程中用相对密度2.02的泥浆钻至井深4243.5m发生井漏,漏速达50m³/h以上,反映出有张裂缝存在。

(3)阳新统测试获气井率高达40%,钻井动态显示率达33.3%,成为仅次于卧南的高产气区(表6)。

表6 卧龙河构造阳新统分区钻探成果表

构造分区	探井数	总显示井数(口)	显示率(%)	显示分类						测试情况				测试气产量			
				气侵		井喷		井漏		测试率		获气井率		总产量 (万 m ³ /d)	气产井气 平量均	占%	裂缝系统 数
				总井数	百分比	总井数	百分比	总井数	百分比	总井数	百分比	气井数	百分比				
卧北	13	6	46.2	3	50	1	16.7	2	33.3	5	38.5	2	40	51.06	25.53	20.3	2
卧中	18	12	66.7	9	75	4	33.3	2	16.7	7	38.9	1	14.3	4.02	4.02	1.6	1
卧南	24	19	79	13	68	4	21	7	37	12	50	8	67	196.13	24.52	78.1	6

2. 卧中区

位于卧龙河构造中段主轴及东缓翼地带,面积约24km²。

(1)模拟实验形变场 $\Delta\sigma'$ 为张性破裂中值区,纵张缝局限发育于构造枢纽部,有限元构造应力场为高中值破裂区,说明张性破裂发育不均一。

(2)构造轴向展布平直、定向性强,主要承受单向压应力,导致张性破裂搭配条件差,分布不稳定,难以形成较大的裂缝连通系统。

(3)测试获气井率低,仅14.3%(表6),钻井动态以气侵显示为主而表现裂缝形迹的井漏现象则少见(仅16.7%)。说明本区虽处构

造中段主轴高曲率区,但张性裂缝的搭配条件及连通渠道不理想,影响了烃类的运移和储集。故钻获的少数工业气井多受主断层带控制,其余探井经多次酸化,亦未获好效果。

3. 卧南区

位于多组构造交汇、复合明显地带,表现出受力的多期性、复杂性和边界效应的特殊性。为阳新统致密碳酸盐岩储集层构造应力的集中和裂缝发育创造了极为有利的条件。

(1)为三维有限元应力场优越部位,处于双高应力区背景。力学模拟及小型构造揭示的裂缝分布模式均说明该区纵、横张裂缝发育且搭配条件好,张裂缝空间体积增大,大大

改善了裂缝的通道条件和对天然气的储集性能。

(2)位于卧龙河、双龙“S”形构造的凸侧,分别控制了卧67、127井及双11井三大裂缝系统的分布。

构造凸侧横张缝的发育弥补了不均一分布的纵张缝。纵、横张缝相互交织有机搭配并连通其它缝洞空间,从而形成一连通渠道好、储集条件优越的大裂缝连通系统。卧67井裂缝系统纵向连通了茅口组,连通深度300m,平面连通范围近6km²,故形成盆地范围内继自2井之外出现的高储量、高产量大气藏。

(3)为阳新统测试获气井率最高地区(达67%)。钻井动态井漏显示并计7口之多,显示率达37%,并控制了全构造80%的高产气井的分布,而且所获高产气井均属未经酸化由试油或射孔而获气。

结 论

(1)依据相似理论,通过大变形模拟实验,成功地再现了卧龙河构造剖面 and 立体模式。据形变反推应变的方法恢复了卧龙河构造变形场(ΔS)。从 ΔS 反映的两个高值区看,明显地表现了卧龙河构造的分区性,并与实际地质构造钻试采效果以及三维有限元数学模型的分析结果相一致,证明通过力学模拟实验再现的相似构造模型在理论和方法上具有科学性和实用性。该方法具有花钱少、费时间短、出成果快、获直观效果多以及能定量解释等优点。故针对四川存在多种类型构造,特别是对川东陡构造的研究,如褶皱形成条件、断裂分布规律、发育状况等,可继续开展力学模拟实验,充分发挥现有优势进行研究。

(2)从构造应力场角度探索应力分布与油气富集的关系,对评价裂缝发育区,优选探井井位,具有重要的指导作用。卧龙河构造从

地质、地震、钻探成果及大变形模拟实验反映的分区性与三维有限元成果相一致,进一步说明了三维有限元模拟方法及其成果的实用性和可靠性。

三维应力场反映出南、北两块主应力高值分布区因阳新统顶面构造沿水平方向 σ_1 、 σ_2 呈拉伸状态,故产生纵、横张缝发育区,有利于扩大裂缝空间体积,为天然气及流体的运移提供了良好的通道和聚集场所,并减少了孔隙流体所承受的压力,使天然气向张性破裂区运移富集。卧67、127井高产裂缝连通系统的分布,系受南、北两块高应力及高应变区形成的张性破裂所控制。

(3)卧南地区卧67井高产裂缝系统纵向上连通了茅口组及栖霞组,连通深度逾300m,面积达6.0km²。故形成四川地区少见的大裂缝连通系统,占卧龙河构造阳新统总探明地质储量的80%。卧67井大裂缝系统的形成主要受前述特殊的地质构造环境及构造应力场条件所控制,为天然气的运移和聚集创造了良好的通道和聚集场所,有利的扭动复合构造条件为天然气的富集和保存奠定了必要的基础;构造凸侧横张裂缝发育利于沟通不均一分布的纵张裂缝、次生溶孔,从而形成纵横向上较大范围的连通系统。

参 考 文 献

- 1 霍布斯 B E 等. 构造地质学纲要. 北京:石油工业出版社,1980
- 2 Ramsay J G. Folding and fracture ingofrocks. mc Graw-Hill Bookco, New york, 1967
- 3 格佐夫斯基 M B. 构造物理学基础. 北京:地震出版社,1984
- 4 李四光. 地质力学概论. 北京:科学出版社,1973
- 5 赵从俊等. 四川盆地三叠系储集层构造中性面与油气富集关系. 天然气工业,1981;(2)

宣汉炉厂坪地区构造应力场、应变场分析

黄继钧*

(成都理工学院)

内容提要 本文基于对川东北炉厂坪地区纵弯叠加褶皱特征的研究,进而对该区早晚两期褶皱形成的应力场和应变场作了较系统深入的探讨。结果指出:晚期褶皱发育于早期应力场偏应力微弱地带;单个褶曲为平面应变,复合地区向拉长和压缩区迁移;褶曲核部应变程度大于翼部,复合地区大于非复合地区。

主题词 川东北宣汉炉厂坪地区 构造 应力场 应变场 分析 纵弯褶皱 横跨褶皱

四川东北部宣汉县炉厂坪地区处于七里峡背斜北部倾伏端,构造复杂,发育有早期北东向褶皱和晚期北西向褶皱、断层(图1)。

构造特征

早期北东向褶皱——七里峡背斜为川东北地区一高陡背斜,总体走向北东,北端轴向为北北东 20° 左右,轴面产状 $307^{\circ}\angle 88^{\circ}$,两翼产状分别为 $126^{\circ}\angle 49^{\circ}$ 、 $308^{\circ}\angle 45^{\circ}$,枢纽产状

$39^{\circ}\angle 3^{\circ}$,向北东方向倾伏,北端炉厂坪一带转折端较开阔,向南西渐趋狭窄。

晚期北西向褶皱主要为大垭口背斜、田家榜向斜、三角山背斜和伍湾向斜。①大垭口背斜展布于唐家湾、大垭口一带,总体走向为北 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 西,北东翼倾角 $29^{\circ}\sim 36^{\circ}$,南西翼倾角 $12^{\circ}\sim 35^{\circ}$,向北西方向两翼产状逐渐变缓,转折端较开阔,顶角 110° ,轴面产状 $225^{\circ}\angle 79^{\circ}$,枢纽产状 $311^{\circ}\angle 10^{\circ}$ 。②田家榜向斜

6 赵从俊,四川盆地构造垂向变异特征类型及其机理探讨,石油学报,1984;5(2)

7 赵从俊,川东相14井石炭系岩心揭片裂缝研究及储集层控制因素探讨,天然气勘探与开发,1979;(3)

8 赵从俊等,川东构造应力场与油气富集规律探讨,石油学报,1989;10(2)

9 赵从俊,弯曲形变层内应力分布与四川致密碳酸盐岩气藏富集规律,石油勘探与开发,1986;13(2)

10 科茨 D F. 岩石力学原理,北京:冶金工业出

版社,1987

11 古登堡 B. 地球内部物理学,北京:科学出版社,1959

12 王 仁等,固体力学基础,北京:地质出版社,1979

13 监凯维奇 O C. 有限元法,北京:科学出版社,1985

14 铁摩辛柯等,板壳理论,北京:科学出版社,1977

(修改回稿 1992-02-08)

* 610059,四川省成都市十里店。

CONTENTS

EXPLORATION AND DEVELOPMENT

Zhao Congjun, Zhang Jian, Shen Hao, Ma Jianyong and Tian Xiaoyan: Quantitative Study on the Mechanism of Forming Wulonghe Structure and Fracture Distribution Law in East Sichuan, NGI 13(6), 1993: 1~9

In the light of similarity theory and method, through mechanical simulation test, the mechanism-forming, stress distribution and the relation between fracture growth law and gas pool accumulation of Wulonghe structure in East Sichuan are discussed by first time using tridimensional finite element and syntheizing drilling data and seismic achievements. The study result tallies with field exploration, thus providing basis for optimum seeking well location in the structure.

Subject Headings: East Sichuan, similarity theory, simulation test, tridimensional finite element, rock mechanics, structure mechanism-forming, structure stress field.

Huang Jijun: Analysis of Structural Stress Field and Strain Field of Luchangping Area in Xuanhan County, NGI 13(6), 1993: 9~17

Based on studying the characteristics of vertical bend superposition folds of Luchangping area in Northeast Sichuan, the stress field and strain field formed by the folds in early and late periods in the area are systematically discussed in this paper. The discussion result shows that the late period folds had grown in feeble deviation stress area of early period stress field; the single fold is plane strain, complex area migrates to the area of lengthening and extruding; the strain degree of fold kernel part is bigger than wing part and the one in complex area is bigger than in non-complex area.

Subject Headings: Northeast Sichuan area, structure stress field, strain field analysis, vertical bend folds, cross folds.

Luo Yutian, Ni Shijun and Li Shue: Study on the Fracture Characteristics of Oil Field T in Jiangnan Basin, NGI 13(6), 1993: 18~22

In the light of the fracture mechanics and rock physics characteristics of reservoir rocks, a semi-quantitative method for forecasting fracture distribution is proposed in this paper. The fracture systems of oil field T in Jiangnan Basin are evaluated by the method to obtain some basic cognizances of fracture distribution and gaining hydrocarbon compounds in the fracture systems.

Subject Headings: Jiangnan Basin, structure fracture, fracture mechanics, fractured reservoir, characteristics.