

# 利用排驱压力研究断裂封闭性及其在塔里木盆地北部地区的应用

周 新 桂

(中国地质科学院地质力学研究所)

**摘 要** 排驱压力是实现油气二次运移所需的最小驱动力,是研究油气二次运移和评价封堵能力的主要指标。断裂的封闭和开启性取决于断裂两侧和断裂带内物质之间差异排驱压力的大小,差值愈大,断裂封闭性愈好,反之愈差。但断裂的封闭性不是一成不变的,一旦油气聚集超过了由差异排驱压力控制的油气柱高度时,断裂将显示开启性;另外,随断裂发育时间和部位的不同,封闭性也不一样。本文着重研究塔里木盆地北部柯坪南缘断裂、印干断裂、库鲁克乌居木等断裂的封闭性问题,并考虑该区压力封闭的下限值及油气流动  $r_{c30}$  下限值,研究结果与实际地质调查相吻合。这一研究方法为今后在塔里木盆地北部油区全面开展断裂封闭性研究提供了新的思路,具有重要的理论意义。

**关键词** 排驱压力 断裂封闭性 控油作用

## 1 理论模型的建立

断裂的出现不仅影响断裂上下盘岩层的构造变形、岩石的物理特性等,而且对其中的流体具有封闭和疏导作用。油气在岩石中运移的实质主要是克服毛管阻力(即贾敏效应)。分析断裂两侧对置岩层及断裂带内岩石的毛管阻力大小是研究断裂控油作用的关键,为此我们引入排驱压力这一概念来研究断层的封闭性问题。

排驱压力又称“入口压力”(entry pressure),一般指非润湿相进入岩样最大喉道半径的毛管压力<sup>[1]</sup>。毛管压力理论公式

$$p_c = \frac{2\epsilon \cos\theta}{r}$$

式中:  $p_c$  毛管压力;  $\epsilon$  流体表面张力;  $\theta$  流体润湿接触角;  $r$  喉道半径。

可以看出,喉道半径愈小,毛管压力愈大,即相应排驱压力愈大,油气愈难进入岩石喉道;反之,喉道半径愈大,毛管压力愈小,即相应排驱压力愈小,油滴易克服其阻力进入岩石孔隙。

1996年 7月 25日收稿。

国家“八五”攻关项目《新疆塔里木盆地北部主要断裂应力场特征及油气关系》成果的一部分。

中,实现其运移。因此,排驱压力是实现油气二次运移所需的最小驱动力。排驱压力可作为研究油气二次运移和封闭能力的主要指标

陈立官(1982)研究表明<sup>[2]</sup>,在亲水岩石内,断面两侧岩层和断面物质的排驱压力,决定断层是否封闭。如果断面两侧岩层的排驱压力相同或接近,则此处断层开放;反之,如果断面两侧岩层的排驱压力相差悬殊,则该处断层是封闭的,且排驱压力相差愈大,封闭性愈好。如果断面物质的排驱压力大于断面两侧岩层的排驱压力,断层也是封闭的,反之就不封闭。但是,断层封闭性也不是一成不变的(图1)。

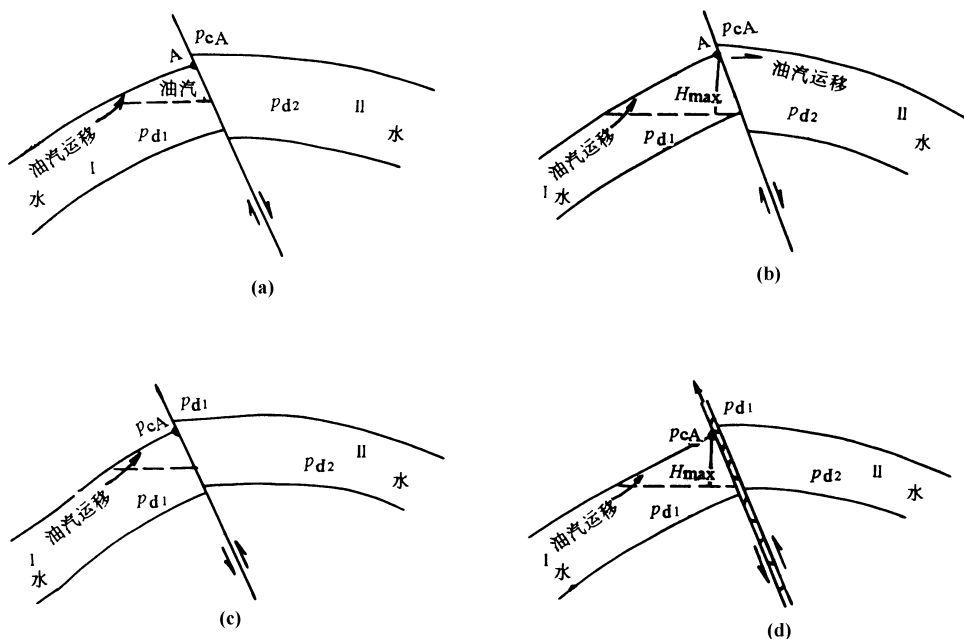


图1 断面两侧岩层和断面物质排驱压力差异引起断层封闭与开启理论模型  
(据陈立官修改,1982)

Fig. 1 Theoretical model demonstrating fault closure and opening caused by exhausting and driving pressure difference in both side rocks of the fault and materials in the fault

a.  $p_{d1} < p_{d2}$  且  $p_{cA} < p_{d2}$ ; b.  $p_{d1} < p_{d2}$  且  $p_{cA} = p_{d2}$  且  $H_{max} > h_{max}$ ; c.  $p_{d1} < p_{d3}$  或  $p_{d2} < p_{d3}$ ; d.  $p_{d1} < p_{d3} < p_{d2}$  且  $p_{d3} > p_{cA}$  且  $H_{max} > h_{max}$ ;  $p_{d1}$ . 储层I 排驱压力;  $p_{d2}$ . 储层II 排驱压力;  $p_{d3}$ . 断裂带排驱压力;  $p_{cA}$ . A 点处毛管压力。

图1模型中  $H_{max}$ 、 $h_{max}$ 为排驱压力差和 A点毛管力所控制的最大油气柱高度,据毛管压力理论<sup>[1]</sup>。

$$p_c = \Delta dgh$$

$$H_{max} = \frac{(p'_d - p''_d)}{(d_w - d_h)0.433}$$

$$h_{max} = \frac{p_{cA}}{(d_w - d_h)0.433}$$

其中  $p'_d$ 、 $p''_d$ 为研究对象对应的排驱压力( $\times 0.1MPa$ );  $p_{cA}$ 为断面 A点处毛管压力( $\times 0.1MPa$ );  $d_w$ 、 $d_h$ 分别为油层条件下水和油气密度( $\times 10^{-3}kg/lm^3$ );  $\Delta d$ 为水和油气密度差;

0.433是毛管压力、流体密度和高度导出的常数

当储层I的排驱压力小于储层II的排驱压力时,该处断裂是封闭的,下盘油气向高部位移聚成藏(图 1a) 当油气藏达到一定规模,即由排驱压力差控制的最大油气藏高度大于或等于A点处毛管力所控制的油气最大高度时,油气将通过断面向储层II作横向运移,此时,断裂就不起封闭作用(图 1b) 如果断面物质的排驱压力分别大于储层I、II的排驱压力,那么断裂处于封闭状态(图 1c),如果是模型图 1d的情况,油气只能存在于断裂下盘,当油气柱达到一定高度时断面显示开放性,油气将沿断面作垂向运移进入上部有利层位

上述模型是以毛管理论为基础,考虑不同性质断裂而建立的基础模型 实际工作中会碰到各种情况的断裂,同样可建立相应模型,如砂泥岩相接,断裂不仅可以横向封闭,其纵向也常是封闭的<sup>[3]</sup>。可见运用排驱压力确定断裂的封闭性是有效的

## 2 排驱压力的求取和处理方法

国内常用压汞法测定毛管压力,毛管压力曲线系由此法测得的压力和相应汞饱和度作出 实验测定汞表面张力  $e_{Hg}$  为  $480 \times 0.1 \text{ Pa}$ , 润湿角  $\theta_{Hg}$  为  $140^\circ$ , 由此可得出求喉道半径( $r$ )另一简化公式

$$r = \frac{2e_{co}\theta}{p_{Hg}} = \frac{7.5}{p_{Hg}}$$

理想毛管压力曲线(图 2)呈三段式,中间平缓直线段代表非润湿相(汞)进入阶段,延长直线段与喉道半径坐标轴交于一点  $r_{max}$ ,沿该点作水平线与压力坐标轴交点  $p_d$  即为所求的排驱压力 在实际工作中,往往出现特殊情况,曲线三段式不明显,因此排驱压力求取比较困难或由此产生较大误差,我们采用突破压力( $p_{c10}$ )来近似代替排驱压力分析断层封闭性 突破压力即非润湿相进入岩样后,当饱和度达 10%时所附加的压力值,为了进一步切合实际,在进行突破压力比较时,需参考  $p_{c30}$ ,甚至  $p_{c50}$  来分析断裂封闭程度

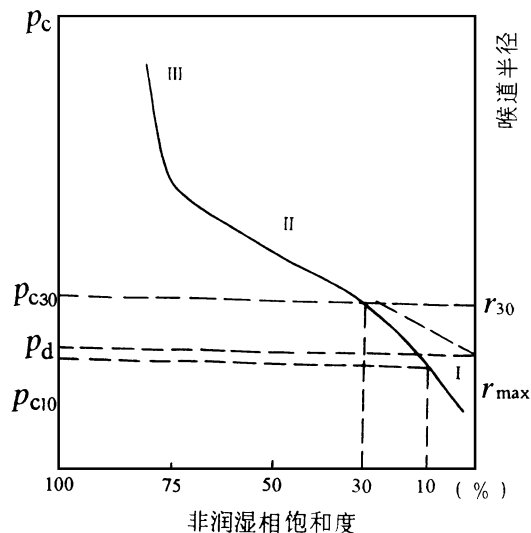


图 2 理想毛管压力曲线示意图

Fig. 2 Demonstrative map of ideal capillary pressure curve

$p_d$ 、排驱压力;  $p_{c10}$ 、 $p_{c30}$  为非润湿相饱和度达 10% 和 30% 时压力;  $r_{30}$ 、非润湿相饱和度为 30% 时喉道半径;  $r_{max}$ 、最大喉道半径

## 3 塔里木盆地北部柯坪地区断裂封闭性研究

本文侧重在柯坪南缘、印干断裂、库鲁克乌居木等断裂进行此项研究工作。

### 3.1 断裂封闭性评判标准

在分析断裂封闭性时,应考虑以下几种情况 ① 以  $p_{c10}$  为主要指标,参考  $p_{c30}$  和  $p_{c50}$ ; ② 当排驱压力  $p_d > 100 \times 0.1 \text{ MPa}$  可起盖层作用,可作封闭下限; ③  $r_{c30} > 0.1 \mu\text{m}$  为气体流动下限,  $r_{c30} > 0.2 \mu\text{m}$  为油气流动下限; ④ 断裂带和两侧对应储层中样品新鲜; ⑤ 采取塔北地区孔隙度评

价值来评价岩样孔隙度的大小

塔里木盆地北部地区古生界孔隙度评价参数: 丘里塔格群 (C<sub>3</sub>- O<sub>1</sub>) 储层 O 在 0.6- 1.0% 之间为差- 较差储层; 上石炭康克林组 (C<sub>3k</sub>) 储层 O 在 < 2- 4% 储集性能差; 泥盆系依木干他乌组 (Dy) 砂岩在 9.8% 以下为较差储层。以此来评价所测岩样 (见表 1) 储层所属级别: ① 上石炭康克林组 泥盆系依木干他乌组砂岩, 总体小于 6.2%, 大多在 1.05- 1.77% 之间, 定为差- 极差储层; ② 康克林组灰岩孔隙度为 3.97%, 如微裂隙发育可成为好储层; ③ 丘里塔格群白云岩、下二叠玄武岩, 除 P<sub>4</sub> 岩样孔隙度 > 1% 以外, 其余均小于 0.63%, 为差、极差储层。

通过与塔里木盆地储层孔隙度比较, 岩样孔隙度普遍减少, 其原因不外乎断裂作用, 从毛管理论来讲, 岩样孔喉的变小是断裂封堵的先决条件。

3.2 断裂封闭性评价

研究区毛管压力曲线主要特征参数见表 2

表 2 柯坪-沙井子露头区毛管压力曲线主要特征参数

Table 2 Main characteristical parameters of capillary pressure curves in the Kepin-Sajinze exposed region

样品号	$p_{e10}$ (0.1MPa)	$p_{e30}$ (0.1MPa)	$p_{e50}$ (0.1MPa)	$r_{e10}$ ( $\mu$ m)	$r_{e30}$ ( $\mu$ m)	$r_{e50}$ ( $\mu$ m)	$H_{10}$ (m)	$H_{30}$ (m)	$H_{50}$ (m)	$r_c > 0.075^{\mu}$ m (%)	$r_c > 0.1^{\mu}$ m (%)	$r_c > 0.2^{\mu}$ m (%)
P <sub>1</sub>	29.315	72.113	176.287	0.256	0.104	0.043	119.555	296.099	718.954	39.520	33.794	17.469
P <sub>2</sub>	30.993	67.464	133.260	0.242	0.111	0.056	126.399	275.137	543.476	44.649	37.054	16.833
P <sub>4</sub>	16.028	52.578	196.267	0.468	0.143	0.038	65.366	214.431	800.435	41.799	37.557	23.927
P <sub>5</sub>	2.827	348.160	983.040	2.653	0.022	0.008	11.528	1419.920	4009.136	25.000	25.000	25.000
P <sub>8</sub>	7.223	220.891	675.840	1.038	0.034	0.011	29.457	90.862	2756.282	28.866	28.866	28.866
P <sub>9</sub>	64.881	134.682	286.380	0.116	0.056	0.026	264.603	549.274	1167.945	23.746	17.127	4.269
P <sub>10</sub>	106.091	249.714	635.027	0.071	0.030	0.012	432.670	1018.410	2389.834	9.192	6.396	0.7549
P <sub>16</sub>	153.600	978.489	/	0.049	0.008	/	626.427	3990.575	/	8.000	8.000	5.470
P <sub>17</sub>	29.842	48.567	441.108	0.251	0.154	0.017	121.706	198.070	1798.971	32.813	32.813	22.729
P <sub>18</sub>	409.600	/	/	0.018	/	/	1670.474	/	/	9.754	6.344	/
P <sub>25</sub>	114.103	315.977	983.040	0.066	0.024	0.008	465.346	1288.051	4009.136	8.400	8.400	8.252
P <sub>26</sub>	43.703	162.746	309.079	0.172	0.046	0.024	178.234	663.729	1260.518	17.421	15.120	9.782
P <sub>27</sub>	45.176	123.733	234.529	0.166	0.061	0.032	184.243	504.622	956.481	25.134	20.691	8.622
P <sub>28</sub>	145.496	282.122	464.842	0.052	0.027	0.016	593.378	1150.581	1895.767	3.166	2.180	0.219

注:  $p_{e10}$   $p_{e30}$   $p_{e50}$  代表非润湿饱和度达 10%、30%、50% 时的压力;  $r_{e10}$   $r_{e30}$   $r_{e50}$  代表压力为  $p_{e10}$   $p_{e30}$   $p_{e50}$  时对应的喉道半径;  $H_{10}$   $H_{30}$   $H_{50}$  代表毛管压力  $p_{e10}$   $p_{e30}$   $p_{e50}$  控制的油气柱高度;  $r_c$  喉道半径。

3.2.1 柯坪南缘断裂封闭性研究 勒亚依里塔格西南 3km 处, 断裂发生在上石炭康克林组

表 1 岩样孔隙度数据

Table 1 Samples  $\varphi$  figure

岩样号	时代	岩性	孔隙度%
P <sub>1</sub>	C <sub>3k</sub>	泥质白云岩	3.97
P <sub>2</sub>	C <sub>3k</sub>	砂岩	1.66
P <sub>4</sub>	-C <sub>3</sub> -O	白云岩	1.45
P <sub>5</sub>	P <sub>1bc</sub>	泥灰岩	0.4
P <sub>8</sub>	-C <sub>3</sub> -O	白云岩	0.34
P <sub>9</sub>	Dy	砂岩	6.2
P <sub>10</sub>	Dy	砂岩	4.74
P <sub>16</sub>	-C <sub>3</sub> -O	白云岩	0.63
P <sub>17</sub>	-C <sub>3</sub> -O	白云岩	0.45
P <sub>18</sub>	P <sub>1</sub>	玄武岩	0.15
P <sub>25</sub>	Dy	砂岩	1.05
P <sub>26</sub>	Dy	砂岩	1.77
P <sub>27</sub>	Dy	砂岩	1.25
P <sub>28</sub>	Dy	砂岩	3.43

砂岩和白云岩之间,岩样  $P_1$ 、 $P_2$  分别采自断裂两侧对应的泥质白云岩和砂岩地层。其毛管压力  $p_{c10}$  之间和  $p_{c30}$  之间十分接近,均小于  $100 \times 0.1 \text{ MPa}$ ; 喉道半径大于  $0.2 \mu\text{m}$  约占 17%, 小于  $0.2 \mu\text{m}$  占 83%,  $r_{c30}$  在  $0.104 \sim 0.11 \mu\text{m}$  之间(表 2, 图 3), 所以此处断裂对油气封闭性能差, 尤其对气不具封闭性。

勒亚依里塔格西南 6km 处, 断裂西北侧岩样  $P_4$  为丘里塔格群白云岩; 南东侧岩样  $P_5$  为下二叠泥灰岩。两者  $p_{c10}$ 、 $p_{c30}$  差值很大, 毛管压力曲线有显著差异(图 4)。另外,  $P_4$  岩样  $r_{c30}$  为  $0.143 \mu\text{m}$ , 而  $P_5$  岩样  $r_{c30}$  为  $0.022 \mu\text{m}$ (表 2), 说明断裂该处对油气封闭性能较好, 在泥灰岩储层中能控制 53.838m 高油气柱, 如过量油气运移断裂将显示开启性。

西克尔段—柯坪南缘断裂带内次级断裂北侧丘里塔格群中  $P_8$  样为灰白色中层白云岩;  $P_{10}$  为断裂南侧依木干他乌组(Dy)紫红色砂岩;  $P_9$  采自断裂带中灰、黄绿色砂岩。三者比较,  $p_{8e10} < p_{9e10} < p_{10e10}$  且  $p_{10e10} > 100 \times 0.1 \text{ MPa}$ <sup>①</sup>,  $r_{c30}$  在  $0.030 \sim 0.056 \mu\text{m}$  之间(表 2, 图 5), 因此该处断裂具有良好封闭性。北盘白云岩储层由  $p_{8e10}$ 、 $p_{9e10}$  压力差可控制油气柱高达 235.146m。

总而言之, 柯坪南缘断裂封闭性从西向东由好向较好, 再向差渐变, 自然西部优于东部, 中西段控制油气藏有效高度为 58~235m。

**3.2.2 印干断裂封闭性评价** 采样点位于印干村段,  $P_{16}$  采自断裂西侧白云岩,  $P_{17}$  采自断裂带内白云岩,  $P_{18}$  采自东侧玄武岩。测试结果见表 2 图 6, 有  $p_{17e10} < p_{16e10}$  且  $p_{17e10} < p_{18e10}$  且  $p_{16e10}$ 、 $p_{18e10}$  都大于  $100 \times 0.1 \text{ MPa}$ , 而  $p_{17e10}$  仅为  $29.842 \times 0.1 \text{ MPa}$ , 说明断裂带显示开启性, 对油气起垂向输导作用, 横向处于封堵状态。地表观察, 断裂带及近旁见二叠系砂岩有丰富的油气显示, 测试结果与实际完全吻合。

**3.2.3 库鲁克乌居木断裂封闭性分析** 采样位置在库鲁克乌居木村东, 样品全为泥盆系依木干他乌组砂岩, 断裂发生在其中。  $P_{25}$  采自断裂北侧,  $P_{27}$  采自断裂南侧,  $P_{26}$  采自断裂带内。从表 2 图 7 可以得出  $p_{27e10} \approx p_{26e10} < p_{25e10}$ ,  $p_{c30}$  均大于  $100 \times 0.1 \text{ MPa}$ ,  $r_{c30}$  分布在  $0.024 \sim 0.016 \mu\text{m}$  范围且  $r_{c30} > 0.2 \mu\text{m}$  仅占 8.2~9.8%, 综合判断断裂东段具较好封闭性。断裂带采样处及附近没有发现油气显示, 断层封闭了油气。

**3.2.4 库鲁克乌居木村东 NE 向扭断断裂封闭性分析**  $P_{28}$  采自断裂东南侧依木干他乌组砂岩,  $P_{27}$  在断裂西北侧,  $p_{27e10} < p_{28e10}$  且  $p_{28e10} > 100 \times 0.1 \text{ MPa}$ (见表 2, 图 8), 该处断裂封闭性好。

利用排驱压力(突破压力)分析断裂封闭与开启性问题具有很强的探索性, 难免有不足之处, 待后完善, 但其方法是公认可行的。

## 4 断裂封闭性与油气关系

断裂的封闭或开启是相对于某一时期或某段而言。同一断裂可以在某一时期表现为开启性, 而在另一时期具封闭性; 同一断裂同一时期不同段也表现出差异性。油气的封闭和开启取决于各期断裂两侧物质的排驱压力大小、两侧岩层对置关系及断裂带内物质成分、结构。因此, 断裂对油气的输导作用主要表现在两个方面: ① 单一垂向输导; ② 纵横向迭合输导<sup>[4]</sup>。差异排驱压力大小是断裂封闭或开启的主要因素, 直接影响断裂两旁油气圈闭能力大小——油气柱高度, 因此对于与断裂关系密切的圈闭, 油气源充足与否固然是一个重要因素, 但排驱压力差是控制构造圈闭油气流充满率的关键, 在油气勘探中必须重视断裂封闭条件和圈闭能力的研究。

①  $p_{nc10}$  代表岩样  $P_n$  汞饱和度达 10% 时的排驱压力

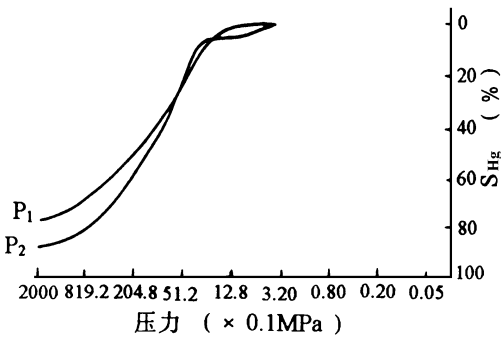


图 3 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>号岩样毛管压力曲线

Fig. 3 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> samples' capillary pressure curves

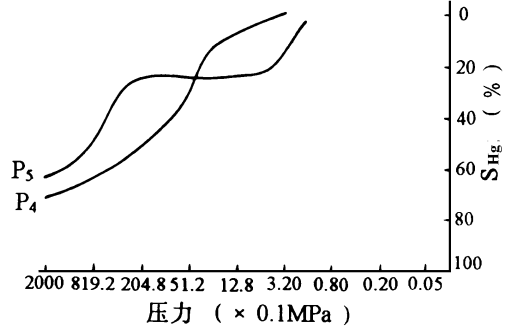


图 4 P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub>号岩样毛管压力曲线

Fig. 4 P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub> samples' capillary pressure curves

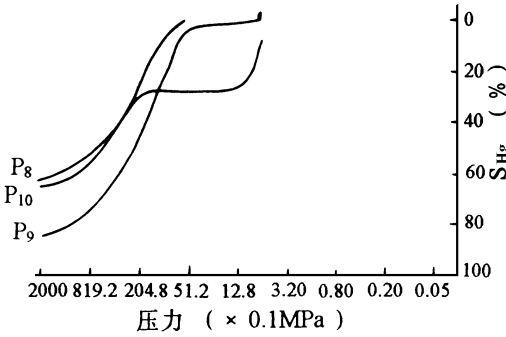


图 5 P<sub>8</sub>, P<sub>9</sub>, P<sub>10</sub>号岩样毛管压力曲线

Fig. 5 P<sub>8</sub>, P<sub>9</sub>, P<sub>10</sub> samples' capillary pressure curves

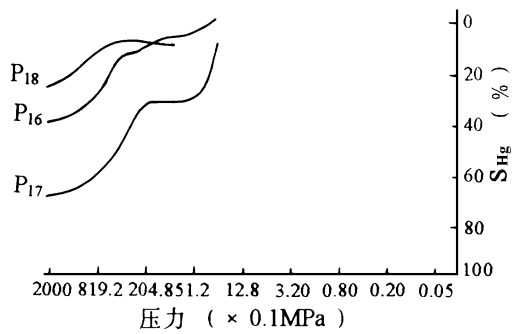


图 6 P<sub>16</sub>, P<sub>17</sub>, P<sub>18</sub>号岩样毛管压力曲线

Fig. 6 P<sub>16</sub>, P<sub>17</sub>, P<sub>18</sub> samples' capillary pressure curves

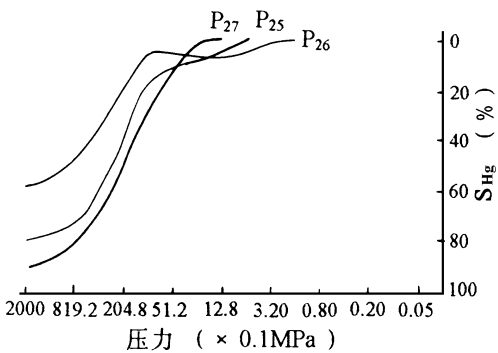


图 7 P<sub>25</sub>, P<sub>26</sub>, P<sub>27</sub>号岩样毛管压力曲线

Fig. 7 P<sub>25</sub>, P<sub>26</sub>, P<sub>27</sub> samples' capillary pressure curves

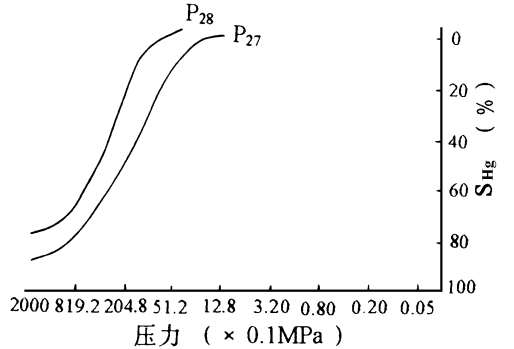


图 8 P<sub>27</sub>, P<sub>28</sub>号岩样毛管压力曲线

Fig. 8 P<sub>27</sub>, P<sub>28</sub> samples' capillary pressure curves

在研究过程和论文编写中,得到导师孙宝珊研究员的精心指导,在此表示衷心感谢!

## 参 考 文 献

- 1 罗蛰潭,油层物理。北京:地质出版社,1984
- 2 陈立官,油气田地下地质学。北京:地质出版社,1982
- 3 钟宏平等,含油气盆地断裂封闭性研究进展综述,地质科技情报,1991,10(2)。
- 4 陈发景、田世澄主编,压实与油气运移。武汉:中国地质大学出版社,1989

# THE STUDY OF FAULT CLOSURE BY USE OF ENTRY PRESSURE AND ITS APPLICATION IN NORTH TARIM

Zhou Xingui

(*Institute of Geomechanics, CAGS*)

**Abstract** The entry pressure is the minimum driving force which is responsible for oil and gas secondary migration and also major index that measures the secondary migration and the blocking capability of a fault. Opening and closing of a fault depends on the difference of the entry pressure in the fault zone and that in its two sides. This paper puts emphasis on the study of closing of southern Keping fault, Yinggan fault and Kulukeyumo fault in the north Tarim basin with reference to the pressure-closed lower limit of mudstone cover and the lower limit of oil-gas migration. The result is consistent with what were observed in the field.

**Key words** entry pressure, fault closure, oil-gas controlling

## 作 者 简 介

周新桂,男,1967年生,助理研究员。1991年毕业于成都理工学院石油系,主要从事石油地质构造研究。通讯地址:北京市海淀区民族学院南路11号地质力学研究所。邮政编码:100081