

文章编号: 1009-6248(2005)04-0072-06

安棚油田储层裂缝特征及其形成期次分析

王国鹏^{1,2}, 胡铨波¹, 张延章¹, 赵琳³, 陶宗普¹

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100029;
3. 中石化河南石油勘探开发研究院, 河南 南阳 473132)

摘 要: 安棚油田深层系储层属扇三角洲相沉积, 储层岩石的成分成熟度和结构成熟度均较低, 岩性胶结致密, 具有特低孔隙度和特低渗透率特征。储层中天然裂缝较发育, 以高角度或垂直裂缝为主, 裂缝中常有部分次生方解石充填, 该类破裂成组出现, 裂缝性质包括张性破裂和剪切破裂, 裂缝成因类型是与区域拉张应力有关的区域性裂缝, 与局部构造变形作用无关。通过对裂缝充填物——次生方解石进行稳定同位素测定, 对储层岩石进行声发射实验, 确定了储层岩石的破裂期次, 研究得到安棚油田储层的天然破裂期次有 4 期, 第二期是主要的破裂期。分析了影响裂缝发育程度的两个方面因素: 一为区域构造应力场强度; 二为储层岩石的力学性质及厚度。并建立了储层厚度与裂缝间距的相关方程, 该关系式可应用于裂缝预测。

关键词: 安棚油田; 特低渗储层; 裂缝成因; 稳定同位素; 声发射; 破裂期次

中图分类号: P618.130.2+1 **文献标识码:** A

1 引言

安棚油田构造位置处于南襄盆地泌阳凹陷安棚鼻状构造 (图 1), 主要含油气层位为古近系核桃园组核三段 V-IX 油组, 油气藏埋深 2 800~3 300 m。油气储层岩性主要为粗—细砂岩和含砾砂岩, 储层平均孔隙度 5.7%, 平均渗透率 $1.81 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于特低孔特低渗致密砂岩储层^[1,2], 储层中发育天然裂缝。为了研究裂缝分布状况, 笔者对裂缝的成因、形成期次及控制因素进行了分析。

2 地层特征

泌阳凹陷地层层序见表 1, 在大仓房组基础上沉积了核桃园组和廖庄组等古近系。安棚油田核桃园组核三段为一套扇三角洲沉积体系^[3]。剖面上由

粗—中—细砂岩和砂砾岩与深灰、灰黑色泥岩互层, 砂层厚度以 5~10 m 为主, 储集层为分流河道砂及前缘砂沉积, 地层厚度及砂层厚度呈南厚北薄的特征。

表 1 泌阳凹陷地层层序简表

Tab. 1 List of stratigraphic sequence of Biyang depression

地层时代	地层单位	地层厚度 (m)	构造运动
新近纪	平原组+上寺组	10~70	晚喜山期
古近纪	中新世	廖庄组	100~300
	渐新世	核一段	500~3 000
		核二段	
	晚始新世	核三上段	
		核三下段	
	中始新世—古新世	大仓房—玉皇顶组	3 000

收稿日期: 2005-02-18; 修回日期: 2005-06-12

基金项目: 中国石化股份有限公司科技攻关项目“赵凹油田安棚区深层系油藏地质特征研究”部分成果

作者简介: 王国鹏 (1962-), 男, 高级工程师, 1988 年毕业于中国地质大学, 获硕士学位, 现为中国地质大学 (北京) 博士生, 从事石油地质研究工作。

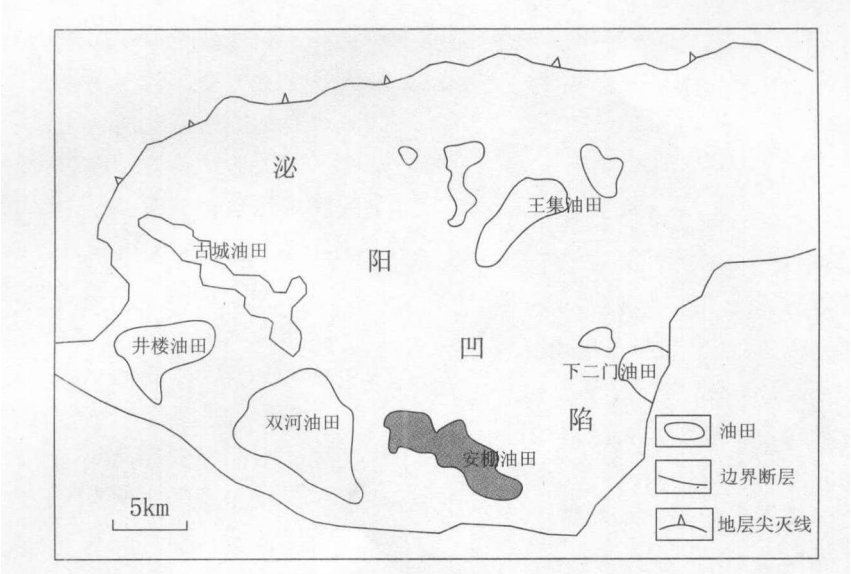


图 1 泌阳凹陷安棚油田位置图

Fig. 1 The location of Anpeng oilfield, Biyang depression

3 构造特征

安棚油田构造形态是一个轴向北西的鼻状构造(图 2)，轴线在泌 185 井至泌 252 井一带略向南弯

曲。区内无断层，Ⅶ油组顶面构造图上 SSW 翼倾角 9.9°，SE 翼倾角 6.9°，反映出南西翼相对较陡。安棚鼻状构造的形成与构造拉张作用关系不大，而与地层的差异压实作用以及差异沉降作用有关。

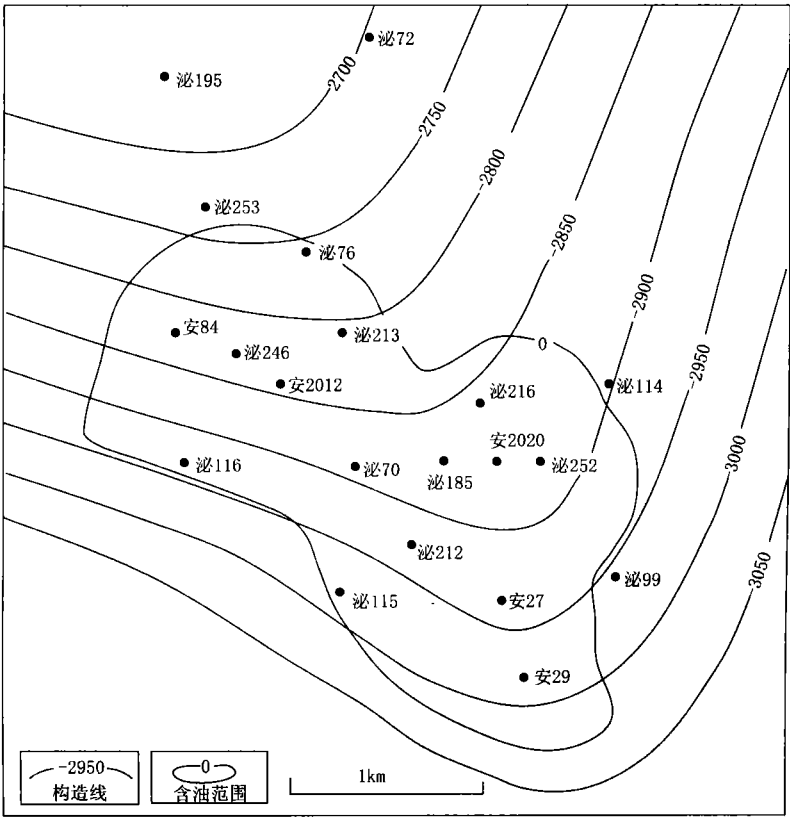


图 2 泌阳凹陷安棚油田构造形态图

Fig. 2 The structure of Anpeng oilfield, Biyang depression

4 裂缝特征描述

4.1 裂缝力学性质

岩心观察储层中的天然裂缝主要是高角度或垂直缝,还有少量的斜交缝^[1]。高角度缝及垂直缝在岩心上广泛发育^[4],倾角在 80°~90°,为储层主要的裂缝类型。未见缝面构造,属于张性破裂,裂缝中常有部分次生方解石充填^[5]。该类破裂成组出现,裂缝间距变化大,缝间距 2~3 cm,与储层厚度有关。由于其产状稳定,且走向与区域最大主应力平行,因此认为该类裂缝是天然的区域性裂缝。此类裂缝在向上、下延伸时受泥质围岩的限制,常终止于泥岩地层与砂岩层之交界面处。

天然剪切破裂缝有缝面构造,为垂向挤压剪切作用产生的高角度(80°)剪切缝,缝面有顺缝方向的擦痕。

在岩心中见有极少量的低角度(倾角在 20°~45°)的斜交缝。这类裂缝为取心诱导破裂,因为缝面不规则,有些呈弯曲状。

4.2 裂缝特征参数

根据定向取心得到垂直或高角度天然裂缝的走向为东偏南 95°~105°。岩心裂缝倾角测量反映天然裂缝以高角度缝及垂直缝为主^[6,7],倾角 70°~90°的裂缝占 30%以上。岩心测量裂缝宽度绝大多数小于 1 mm,取心资料反映高角度及垂直缝长度以 4~30 cm 为主,属于中—短缝,个别井段存在长 1~2 m 的大型裂缝。

5 裂缝成因及形成期次

5.1 裂缝成因分析

根据岩心及测井裂缝研究成果,安棚地区天然裂缝具有如下特征。

(1) 以高角度或垂直缝为主,力学性质属张性破裂,即拉张条件下形成的。

(2) 裂缝成组出现,延伸长度不等,缝与缝之间基本平行,主要走向方向为近东西向,而不受局部鼻状构造所控制。

(3) 裂缝产状相对稳定,而且走向与区域最大主应力方向接近一致^[8]。

依据现代天然裂缝研究成果^[9],认为,区域性裂

缝具有产状稳定、分布广泛、裂缝走向平行于区域最大主应力方向,且为垂直张性缝的特征。研究区裂缝具有区域性裂缝的一切特征,并非是与局部构造变形有关的构造缝,因而归为与区域拉张应力有关的区域性裂缝类型。

古近系核桃园组沉积后经历了两期主要的构造运动^[10]。第一次构造运动(早喜山期)是在古近系核一段和廖庄组之间,该时期为区域性拉张活动,拉张方向为 NNW—SSE;第二次构造运动(晚喜山期)表现为古近系廖庄组顶面与新近系上寺组之间的区域性不整合面,为整个泌阳凹陷的抬升活动,造成廖庄组顶部地层遭受不同程度剥蚀,是最强烈的一次构造运动。

5.2 裂缝形成期次研究

5.2.1 根据裂缝充填物确定破裂期次

充填裂缝的次生方解石稳定同位素测定结果见图 3,可看出核三段裂缝充填方解石同位素可以分出 4 个区,反映裂缝有 4 个成因序列,即有 4 个破裂期:第一时期 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $-10.85\text{‰} \sim -11.218\text{‰}$ PDB, $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-1.43\text{‰} \sim -0.429\text{‰}$ PDB。根据 $\delta^{18}\text{O}$ 测温计算,得到其形成时的埋深和时期^[11,12]。采用 Epstein (1953 年) 提出氧同位素测温方程:

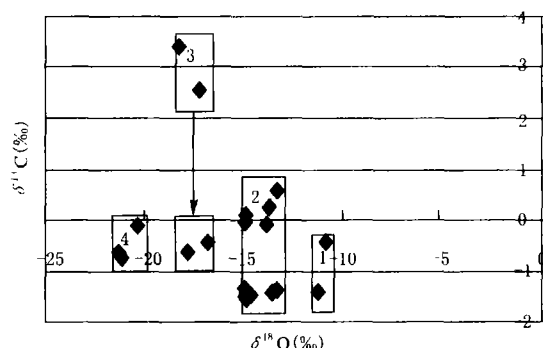


图 3 安棚油田储层垂直裂缝中方解石充填物同位素特征

Fig. 3 The stable isotope characteristics of calcite fillings in the vertical fracture in reservoirs, Anpeng oilfield

$$t(^{\circ}\text{C}) = 31.9 - 5.55 (\delta^{18}\text{O} - \delta^{18}\text{O}_w) + 0.7 (\delta^{18}\text{O} - \delta^{18}\text{O}_w)^2$$

式中: $t(^{\circ}\text{C})$ ——方解石形成时的温度, $^{\circ}\text{C}$;

$\delta^{18}\text{O}_w$ ——形成矿物时水介质氧同位素, ‰ PDB;

$\delta^{18}\text{O}$ ——矿物的氧同位素, ‰ PDB。

根据研究区沉积特征, 核桃园沉积到新近系为湖相-陆相河流体积系, 故对于湖水、河流环境一般取水介质同位素为 -10‰PDB 。

第一期方解石的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 平均 -11‰PDB , 计算形成温度为 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年地面平均温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 地温梯度按 $3.44\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 计算, 形成时埋深约 380 m 。相当于核三段沉积末期, 构造拉张活动形成了少量的区域拉张破裂缝。

第二期 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $-13.306\text{‰}\sim-14.989\text{‰PDB}$, 平均 -14.26‰PDB ; $\delta^{13}\text{C}$ 值 $0.562\text{‰}\sim-1.561\text{‰PDB}$ 。

计算形成温度为 $68\text{ }^{\circ}\text{C}$, 埋深约 $1\,250\text{ m}$, 相当于核桃园组沉积中一后期, 表明大多数裂缝产生于该时期, 是由区域性拉张活动而形成的。

第三期 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $-16.789\text{‰}\sim-18.264\text{‰PDB}$, 平均 -17.51‰PDB ; $\delta^{13}\text{C}$ 值 $0.643\text{‰}\sim-3.4\text{‰PDB}$, 形成温度为 $113\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其形成时埋深为 $2\,560\text{ m}$, 表明该期裂缝是在古近系沉积末期构造拉张活动条件下形成的。

第四期 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $-20.334\text{‰}\sim-21.275\text{‰PDB}$, 平均 -20.9‰PDB ; $\delta^{13}\text{C}$ 值 $0.644\text{‰}\sim-0.132\text{‰PDB}$ 。形成温度为 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$, 计算形成时埋深为 $4\,360\text{ m}$, 反映出其为新近系构造拉张活动的产物。这一埋深大于目前样品的深度, 说明在新近系沉积以前, 由于构造抬升使地层遭受大量剥蚀, 剥蚀量约 $1\,300\text{ m}$ 。

5.2.2 岩石声发射实验确定破裂期次

本次研究对安 84、安 2020、安 2012 定向取心

井的三组样品(共 51 个样)进行了岩石声发射实验。声发射为材料内部缺陷(一般为格里菲斯微裂纹)在加载过程失稳扩展, 能量快速释放而产生的一种瞬态弹性波现象^[13]。德国学者 J. Kaiser (1953) 发现了材料加载实验中这种弹性波效应, 称 Kaiser 效应, 通过研究发现声发射活动对材料载荷历史的最大载荷值具有记忆能力, 根据样品声发曲线上 Kaiser 效应点的个数可以知道岩石的受荷历史。从研究区 51 个样品的声发射实验成果来看, 样品最多的有 4 个 Kaiser 效应点, 反映该区核三段有 4 个破裂期(微裂纹期)的应力值。根据 Kaiser 效应点对应的样品正应力, 计算出各破裂期的地应力值及其最大水平主应力方向(表 2), 共有 4 种级别的水平应力。

I 级: 最大水平主应力 $\sigma_{\text{H}}9.71\sim14.47\text{ MPa}$, 最小水平主应力 $\sigma_{\text{h}}3.77\sim8.75\text{ MPa}$, 最小水平主应力方向为 $\text{NE}1.21^{\circ}\sim5.34^{\circ}$ 和 $\text{NW}333.4^{\circ}$ 。

II 级: $\sigma_{\text{H}}13.78\sim21.64\text{ MPa}$, σ_{h} 为 $10.26\sim15.52\text{ MPa}$, 最小水平主应力方向为 $\text{NE}14.72^{\circ}$ 和 $\text{NW}352.58^{\circ}\sim357.42^{\circ}$ 。

III 级: $\sigma_{\text{H}}18.81\sim29.81\text{ MPa}$, $\sigma_{\text{h}}11.73\sim24.75\text{ MPa}$, 最小水平主应力方向 $\text{NE}4.02^{\circ}\sim10.9^{\circ}$ 及 $\text{NW}354.7^{\circ}$ 。

IV 级: σ_{H} 为 $27.2\sim39.1\text{ MPa}$, σ_{h} 为 $18.49\sim32.11\text{ MPa}$, 最小水平主应力方向 $\text{NE}3.92^{\circ}\sim15.37^{\circ}$ 和 $\text{NW}350.89^{\circ}\sim356.92^{\circ}$ 。可见 4 期构造活动应力场方向基本稳定, 即接近最大主应力方向 EW 向, 而 SN 向接近最小水平主应力方向。

表 2 安棚油田储层岩石声发射各级水平应力及方向计算成果

Tab. 2 The results of the various plane stresses of reservoirs calculate by acoustic emission of Anpeng oilfield

井 号	深度 (m)	I 级			II 级			III 级			IV 级		
		σ_{H} (MPa)	σ_{h} (MPa)	方位 ($^{\circ}$)	σ_{H} (MPa)	σ_{h} (MPa)	方位 ($^{\circ}$)	σ_{H} (MPa)	σ_{h} (MPa)	方位 ($^{\circ}$)	σ_{H} (MPa)	σ_{h} (MPa)	方位 ($^{\circ}$)
安 84	3094.9	10.47	3.77	5.34	19.76	11.07	14.72	27.76	24.75	6.24	37.21	32.11	356.92
安 84	3107.7	14.44	8.75	1.21	20.97	15.52	353.03	28.65	22.22	4.02	37.87	27.87	3.92
安 2020	3100.8	12.55	5.5	2.64	21.64	10.26	357.42	29.81	11.73	354.7	39.1	18.49	350.89
安 2012	3124.5	9.71	3.97	333.4	13.78	11.71	352.58	18.81	16.55	10.9	27.2	19.96	15.37

总之, 安棚油田核三段储层中天然破裂期次有 4 期, 而且第二期样点最多为主要的破裂期, 上述两个方面的资料得到了相互印证。

6 控制裂缝发育的因素

控制天然裂缝发育因素主要有两大方面: 一为

区域构造应力场强度；二为岩石本身的力学性质及刚性岩石的分布。

6.1 构造应力场强度与裂缝发育之间关系

根据屈曲薄板应力场模拟结果（模拟第二期应力值）可以得到主应力场分布及应力方向，拉张应力场强度大小决定了地层中裂缝相对发育的程度。最大水平主应力相对高值区主要分布在鼻状构造轴部一带^[14]，即泌 212 至安 29 井一线和泌 216-泌 252 井一带，这些区域的裂缝相对较为发育。

6.2 岩石力学性质与裂缝发育之间关系

通过单轴抗压强度试验和点荷载抗压、抗张试验得到以下结论：不同岩类在受力破裂时要求的应力条件不同，泥页岩在地层条件下为塑性层，即非破裂层；粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、砾岩为不易破裂层；一般砂岩和含砾砂岩强度居中；溶孔相对发育的含砾砂岩和砾岩为重要破裂层。归纳上述分析，破裂层以砂岩及含砾砂岩等刚性地层为主。

6.3 岩石密度与抗张抗压强度关系

根据岩石密度（饱和盐水）与岩石抗张、抗压强度相关分析，随着岩石密度的增加，其强度增大。即相同岩类，随着岩石孔隙度增大，岩石强度降低，在相同应力条件下更易产生破裂，特别是溶孔发育层段，应作为重要的破裂层考虑。

6.4 砂层厚度与裂缝发育之间关系

对于区域性裂缝，砂层厚度也影响裂缝的发育程度^[15]。岩心观察随着砂层厚度的增大，其裂缝间距有增大的趋势^[16]，说明在同一应力条件下，薄砂层裂缝发育程度比厚砂层要高。二者相关关系为： $H_s = 1\ 649\ 9F_1 + 0.114\ 5$ ($r=0.841\ 3$, $n=12$)

式中： H_s ——岩层厚度，m；

F_1 ——区域性裂缝间距，cm。

7 结论

(1) 安棚油田深层系为靠山型扇三角洲沉积体系，储层属于特低孔特低渗砂岩和砂砾岩，岩石的成分成熟度和结构成熟度较低，储层中天然裂缝以高角度或垂直缝为主，裂缝属张性破裂，主要裂缝组系走向 $SE98^\circ \sim 104^\circ$ ，大多数裂缝的宽度小于 1 mm；裂缝长度主要范围 4~30 cm，以中—短裂缝为主，裂缝孔隙度 0.2%~0.3%，裂缝主要走向近东

西向，裂缝走向与区域最大主应力方向接近一致。应力场模拟表明最大主应力相对高值区位于裂缝相对发育的鼻状构造轴部一带。

(2) 裂缝特征分析表明裂缝类型为区域性裂缝，不受局部鼻状构造控制。根据裂缝充填次生方解石的稳定同位素测定及岩心声发射实验成果，结合构造运动史，确定裂缝有 4 个破裂期，第二期为主要破裂期，即核桃园组沉积中—后期。

(3) 根据岩石力学参数测定和地应力模拟，区域应力场强度与裂缝发育程度关系密切，是影响裂缝发育的外因，而岩性、岩石密度和厚度是影响裂缝发育的内因。破裂层以砂、砾岩等刚性地层为主，随着岩石密度的增加其强度增大，随着砂层厚度的增大其裂缝间距有增大的趋势。最大水平主应力相对高值区主要分布在鼻状构造轴部一带，该区域裂缝相对较发育。

参考文献：

- [1] 裘亦楠，刘雨芬．低渗透砂岩油藏开发模式 [M]．北京：石油工业出版社，1998．
- [2] 文玲．靖安油田延长组长 6 段低孔低渗透储层特征及评价 [J]．西北地质，2001，34 (4)：53-60．
- [3] 顾家裕，中国东部古代扇三角洲沉积 [J]．石油与天然气地质，1984，5 (3)：236-244．
- [4] 孙庆和，何玺，李长禄．特低渗透储层微缝特征及对注水开发效果的影响 [J]．石油学报，2000，21 (4)：52-57．
- [5] 刘林玉，柳益群．吐鲁番—哈密盆地北部中上侏罗统储集层裂缝特征 [J]．石油实验地质，1997，19 (4)：368-370．
- [6] 杨亚娟，张莉，赵阳，等．川口油田长 6 油层裂缝特征及对注水开发的影响 [J]．西北地质，2000，33 (2)：22-26．
- [7] 张莉，杨亚娟，张玉玲，等．陕甘宁盆地川口油田低渗透油藏长 6 油层裂缝特征 [J]．西北地质，2002，35 (2)：42-45．
- [8] 葛和平，孙岩，朱文斌，等．岩石破裂行为的实验研究 [J]．高校地质学报，2004，10 (2)：290-296．
- [9] 王纪祥，陈发景，李趁义．山东惠民凹陷伸展构造及调节带特征 [J]．现代地质，2003，17 (2)：203-209．
- [10] 孙家振，李兰斌，杨振峰，等．泌阳凹陷的含油气构造特征与演化历史 [J]．石油学报，1995，16 (4)：55-61．

- [11] 王兆荣, 支霞臣, 周德昌, 等. 同位素古温度与海平面变化的关系初探 [J]. 地层学杂志, 1997, 21 (4): 289-292.
- [12] 宋忠宝. 同位素地质新进展: 技术、方法、理论与应用 [J]. 西北地质, 2004, 37 (1): 107-108.
- [13] 李道品. 低渗透砂岩油田开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [14] 杨亚娟, 王秀娟, 张莉, 等. 头台油田储层天然裂缝对注水开发的影响 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2001, 31 (1): 71-73.
- [15] 孙宝珊, 丁原辰, 邵兆刚, 等. 声发射测量古今应力场在油田中的应用 [J]. 地质力学学报, 1996, 2 (2): 11-17.
- [16] Narr W and Suppe J. Joint Spacing in Sedimentary Rocks [J]. J. Struct. Geol., 1990, 13 (9).

Reservoir fracture characteristics and generation analysis in Anpeng oilfield, Biyang depression

WANG Guo-peng^{1,2}, HU Xin-bo¹, ZHANG Yan-zhang¹,
ZHAO-Lin³, TAO Zong-pu¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100029, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Sinopec, Nanyang, Henan 473132, China)

Abstract: The paper described the features of extra-low-permeability reservoirs in deep-buried zones of Anpeng oilfield, Biyang depression, Henan province, central China. The buried depth of reservoir is 2 800 ~ 3 100 m, The reservoirs are composed of fan-delta facies deposits. The composition and texture maturity of reservoir rocks is lower. The reservoir porosity distribution ranges 5% to 6%, the permeability distribution ranges 1×10^{-3} to $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. There are more natural fracture developed in Anpeng oilfield. Research on coring and FMI logging indicates that the main fracture occurrence in reservoirs is in a high degree or in vertical. The vertical fracture groups occurrence in reservoir. Adopt advanced technique-oriented coring to get the fracture azimuth. The rosette azimuth diagram shows that the open fracture azimuth range 90° to 110° . The fracture length distribution range 4 to 30 cm, the fracture apertures are smaller than 1 000 μm , the density of fracture is 0.7 per meter, the formation fracture porosity range 0.2% to 0.3%. There are some secondary calcite fillings in the side of fractures. The space between fractures is 2 to 3 cm. It include the extension fractures and shear fractures. The regional tensile stress is the causes of fracture. The secondary calcite stable isotope measurate of the fillings in fracture and the acoustic emission tests of the reservoir rocks indicate that there are four fracture generations. The second generation is the main fracture period. There are two main factors to affect the fracture developing: one is the structure stress field; another is the nature and the thickness of the reservoirs. Finally, the relationship between thickness and fracture space is established.

Key words: Anpeng oilfield; extra-low-permeability reservoirs; fracture causes; stable isotope; acoustic emission; generation of fractures