

鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区上古生界致密砂岩气藏天然裂缝形成机理浅析

邢振辉¹, 程林松¹, 周新桂², 康毅力³, 张林炎²

(1. 中国石油大学, 北京 102200; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 西南石油学院, 四川 成都 610500)

摘要: 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区上古生界致密砂岩气藏的低孔、低压、低渗特点给开发带来了相当大的难度。天然裂缝的存在对致密砂岩气藏经济开发意义重大, 致密砂岩中裂缝发育层段往往是天然气富集区, 天然裂缝能大大改善致密砂岩储层渗透性, 研究其发育状况及分布规律对储层压裂改造及水平井开发技术的实施具有积极的指导意义。塔巴庙地区位于鄂尔多斯盆地北部伊陕斜坡构造带上, 构造平缓, 地层倾角仅 1° 左右, 一般认为不具备裂缝发育条件, 然而大量岩心观察、薄片分析、物性测试、测井及试井资料证实, 研究区的确不同程度地发育垂直裂缝和高角度裂缝。对裂缝的形态、产状、密度及裂缝分布范围研究后认为, 天然裂缝主要是在区域应力、差异压实和异常高流体压力综合作用下形成的, 断裂作用不是该区裂缝发育的主导因素。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 塔巴庙地区; 气藏; 天然裂缝; 机理

中图分类号: P618.130.2⁺5

文献标识码: A

1 区域构造背景

鄂尔多斯盆地属于地台型构造沉积盆地, 盆地发育历史共经历了4个阶段: 1) 早古生代槽台对立发展阶段; 2) 晚古生代槽台由对立趋向统一的发展阶段; 3) 以中生代为主体的陆相盆地发展阶段; 4) 盆地上升解体及新生代地堑系发育阶段。因此, 盆地的构造特征既表现有地台基底稳定性的一面, 又表现有过渡带基底活动性的一面, 形成了盆缘与盆地内部截然不同的两种构造格局。

鄂尔多斯盆地现今构造为平缓西倾的大单斜, 发育较多的向东开口的鼻状挠曲构造, 两翼对称, 构造平缓且方向性差、成带性差。塔巴庙地区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的东北部(图1), 断裂和局部构造不发育。

收稿日期: 2004-07-27

作者简介: 邢振辉(1970-), 男, 高级工程师, 现在中国石油大学(北京)攻读博士学位, 主要从事致密砂岩气藏开发研究工作。地址: 河南郑州伏牛南路197号中石化华北分公司, 邮编: 450006

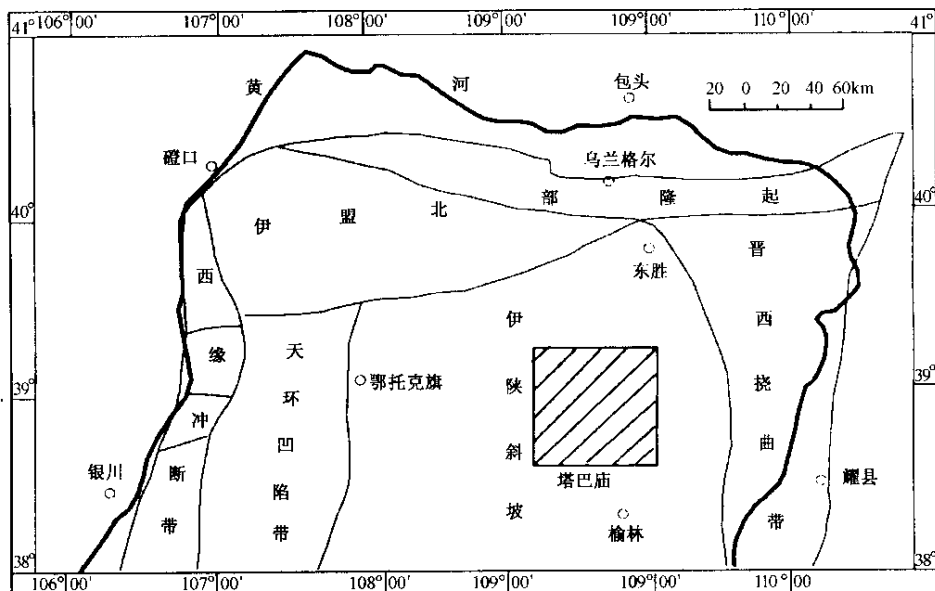


图 1 鄂尔多斯盆地构造区划和研究区位置示意图^①

Fig.1 Diagrammatic map showing the tectonic divisions of the Ordos basin and location of the study area

2 天然裂缝存在的客观性

尽管大的构造背景和应力环境并不支持大规模天然裂缝的发育,但大量岩心观察及薄片鉴定所得到的致密砂岩天然裂缝的直观信息,以及成像测井解释和试井资料分析均证明了天然裂缝的大量客观存在。

2.1 岩心观察及薄片鉴定

岩心观察发现,鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区储层裂缝普遍发育(表1)。按其产状、规模和空间分布等特点可分为两大类:一类是分布相对局限的低角度低序低级次诱导裂缝,裂缝倾角 $10\sim 30^\circ$,被方解石充填,充填程度相对高;另一类是具有区域上较为广泛发育的高角度裂缝,裂缝倾角 $65\sim 90^\circ$,充填程度低(表2)。从整体看来,岩心裂缝长度主要介于 $10\sim 35\text{cm}$ 之间,但也有的长度达到 100cm 以上;裂缝宽度主要分布于 $0.5\sim 2\text{mm}$ 之间。

同时,在铸体薄片和扫描电镜下也观察到大量的天然微裂缝,微裂缝宽 $2\sim 40\mu\text{m}$,其中多为粒缘缝及粒间缝,粒间缝可以切穿多个颗粒,与其它类型孔隙相串联。少数微裂缝部分溶蚀(图2)。

2.2 岩心物性分析

岩心物性分析中,在孔隙度基本相同的条件下,渗透率明显高于平均水平的样品者,一般为样品含裂缝。从塔巴庙地区岩心孔隙度渗透率交汇图可以看出(图3),部分岩样渗透率值明显高于其它样品,渗透率与孔隙度的相关性较差,反映出为裂缝存在的可能性。

① 周新桂,等.鄂北塔巴庙地区构造应力场、裂缝系统定量预测与天然气有利勘探靶区评价[R].2003.

表 1 塔巴庙地区岩心裂缝分类统计^①

Table 1 Statistics of types of core fractures of some coring wells in the Tabamiao area

井号	张性为主裂缝 (条)	扭性为主裂缝 (条)	张:扭	有效裂缝 (条)	无效裂缝 (条)	有效:无效	砂岩裂缝 (条)	泥岩裂缝 (条)	砂裂:泥裂
大探 1	5	6	0.83	9	2	4.5	4	7	0.57
大 2	13	2	6.5	12	4	3	13	2	6.50
大 3	4	11	0.36	6	10	0.6	10	6	1.67
大 4	15	13	1.15	31	0	/	18	13	1.38
大 5	8	14	0.57	18	7	2.57	14	11	1.27
大 6	23	2	11.5	21	4	5.25	13	12	1.08
大 7	3	0	/	3	0	/	3	0	/
大 8	22	8	2.75	26	9	2.89	12	14	0.86
大 9	13	11	1.18	15	13	1.15	17	11	1.55
大 10	14	31	0.45	38	7	5.43	13	32	0.41
大 11	3	4	0.75	5	13	0.38	12	7	1.71
大 12	19	2	9.5	22	0	/	18	5	3.60
大 13	25	14	1.79	26	13	2	23	16	1.44
大 14	14	17	0.82	15	20	0.75	6	23	0.26
大 15	5	10	0.5	13	11	1.18	15	8	1.88
大 16	0	13	0	13	0	/	0	13	0.00
大 17	5	12	0.42	6	11	0.55	14	3	4.67
总 计	191	170	1.12	279	124	2.25	205	183	1.12
百分比 (%)	52.91	47.09		69.23	30.77		52.84	47.16	

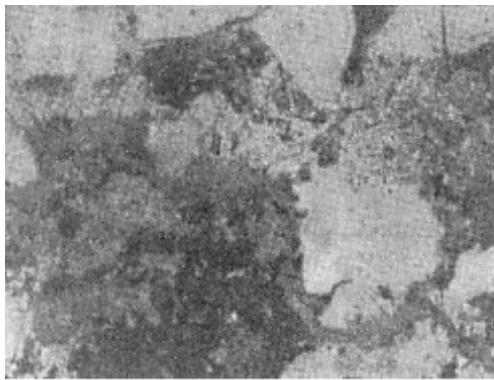


图 2 铸体薄片中的微裂缝 (大 10 井, 山 1 段, 2684.65m)

Fig.2 Micro-fractures observed in thin-section, well D10, 2684.65m deep

① 周新桂, 等. 鄂北塔巴庙地区构造应力场、裂缝系统定量预测与天然气有利勘探靶区评价 [R]. 2003.

表2 塔巴庙地区岩心古地磁定向—裂缝产状定向分析结果^①

Table 2 Analysis of paleomagnetic orientations—fracture attitudes of drill cores in the Tabamiao area

井号	岩心编号	层位	采样深度 (m)	岩性	裂缝整体描述	试件号 (数量)	D平均值 (°)	裂缝产状 (°)
大7井	3 (2/32)	P ₁ x ₃	2681.15 ~ 2681.38	灰色粗砂岩	两组垂直张、张扭缝, 无充填, 长 23cm	G1 (9)	98.6	一组走向: 98.6 ~ 278.6; 另一组走向: 128.6 ~ 308.6
大2井	1 (17/25)	P ₁ x ₂	2718.75 ~ 2719.07	灰绿色岩屑石英细砂岩	高角度张缝锯齿状, 无充填, 长 20cm	G2 (6)	299.5	119.5 ∠ 70 ~ 90SW
	10 (52/55)	P ₁ s ₁	2832.36 ~ 2833.12	浅灰色细砂岩	垂直张缝, 锯齿状, 无充填, 长 43cm	G3 (6)	71.9	走向: 71.9 ~ 251.9
大4井	6 (49/51)	P ₁ x ₁	2761.00 ~ 2761.24	灰绿色含砾中砂岩	高角度张扭缝, 无充填, 长 44cm	G4 (6)	94.3	94.3 ∠ 75NE
	11 (23/73)	P ₁ s ₁	2820.32 ~ 2820.72	灰褐色粗砂岩	高角度张缝, 无充填, 长 27cm	G5 (6)	218.4	38.4 ∠ 80 ~ 85SE
	13 (28/31)	P ₁ s ₁	2855.23 ~ 2855.38	泥质粉砂岩	斜交张扭缝, 无充填, 长 10cm	G6 (6)	168.4	168.4 ∠ 50SW
大6井	6 (55/76)	P ₁ s ₁	2532.18 ~ 2533.18	灰黑色泥质砂岩和泥岩	垂直张缝, 锯齿状, 无充填, 长 100cm	G7 (8)	85.4	走向: 85.4 ~ 265.4
	8 (50/144)	C ₃ t ₂	2555.40 ~ 2556.56	浅灰色粉砂岩	垂直张扭缝, 锯齿状, 无充填, 长 116cm	G8 (5)	246.9	走向: 66.9 ~ 246.9
大8井	4 (45/67)	P ₁ x ₁	2618.68 ~ 2619.13	灰绿色含砾粗砂岩	垂直张缝, 锯齿状, 无充填, 长 35cm	G9 (5)	270.4	90.4 ∠ 65 ~ 90SW
	9 (74/83)	P ₁ s ₁	2722.39 ~ 2722.84	灰白色泥质砂岩	垂直张扭缝, 无充填, 长 100cm	G10 (5)	224.4	走向: 44.4 ~ 224.4
大12井	6 (108/114)	P ₁ s ₂	2782.10 ~ 2782.53	灰白色含砾粗砂岩	垂直张缝, 锯齿状, 无充填, 长 25cm	G11 (5)	253.0	走向: 73.0 ~ 253.0
	8 (7/60)	P ₁ s ₁	2811.17 ~ 2811.89	黑灰色炭质泥岩	垂直张缝、斜交张扭缝, 锯齿状, 无充填, 长 62cm	G12 (3)	218.7	直立缝走向 38.7 ~ 218.7; 斜缝 8.7 ∠ 75 ~ 80SE

2.3 测井解释

应用井下声波电视测井 (BHTV) 可以直观地反映井壁裂缝形态及产状, 裂缝在 BHTV 图上呈黑色条纹。图 4 为大 11 井井下声波电视测井图, 在井深 2714.5 ~ 2719.5m 层段发育高角度裂缝。从 BHTV 幅度图上找出正 (余) 弦曲线的峰值 h , 再结合井眼直径 d , 利用公式 $\phi = \text{Tan}^{-1} (h/d)^{[1]}$, 可计算出裂缝的倾角 ϕ 约为 75°。图 5 为大 13 井山二、太二段声波电视测井图上也出现了高角度裂缝显示, 解释裂缝倾角 72° ~ 90°, 与岩心对比, 具较好的吻合

① 周新桂, 等. 鄂北塔巴庙地区构造应力场、裂缝系统定量预测与天然气有利勘探靶区评价 [R]. 2003.

度。此外，从 BHTV 图上还可以识别天然裂缝与次生裂缝，天然裂缝一般具有较好的镜像对称性，而次生裂缝在井下没有镜像对称关系。图 4 中大 11 井 2714m 及 2717m 深处的 U 字型天然裂缝均反映了这种良好的对称关系。

2.4 地层测试资料分析

DST 测试结果表明，裂缝发育的井试井表皮系数明显增高，调查半径也较大。例如，塔巴庙地区大 1 井表皮系数为 17.8，调查半径为 26.44m；大 6 井表皮系数为 39.7，调查半径为 20.34m，远大于其他井，亦反映了裂缝的存在。岩心观察证实，大 1、大 6 井垂缝发育。

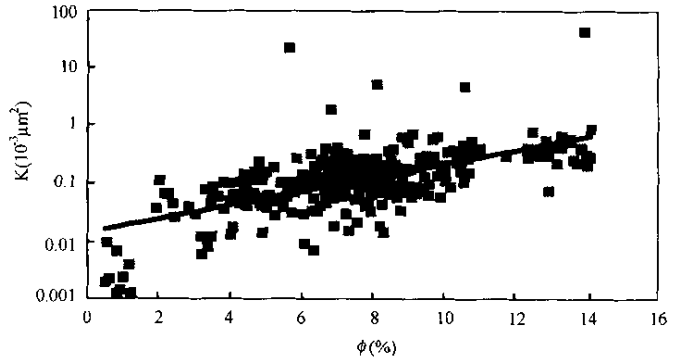


图 3 孔隙度渗透率交汇图^①

Fig.3 Crossplot of porosity and permeability on core analysis data

3 天然裂缝成因探讨

通过对研究区的地质条件、构造史和裂缝的形态、产状、缝面充填情况、裂缝的分布范围等分析认为，影响鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩气藏裂缝形成的主要因素为区域构造应力、差异压实和异常高压作用，而局部断裂构造只对小范围裂缝发育起到一定积极作用。

3.1 区域构造应力场作用

区域构造应力是指整个盆地或盆地的一部分在盆地特定的演化阶段内，由于板块构造运动、区域构造作用和盆地自身特性等因素相互作用而表现出来的大规模、大面积的作用力。在区域构造应力下发育的裂缝具有发育范围大、方位变化小、破裂面两侧无明显水平错断且垂直于主层面的特点。

鄂尔多斯盆地是印支运动使中国大陆处于板内构造体制之后，位于华北稳定克拉通西部的侏罗—白垩纪盆地。它经历了太古宙—古元古代盆地基底岩系形成、中—新元古代裂陷槽、早古生代复合型克拉通、晚古生代—中三叠世联合型克拉通、晚三叠世—白垩纪扭动型大型内陆拗陷和

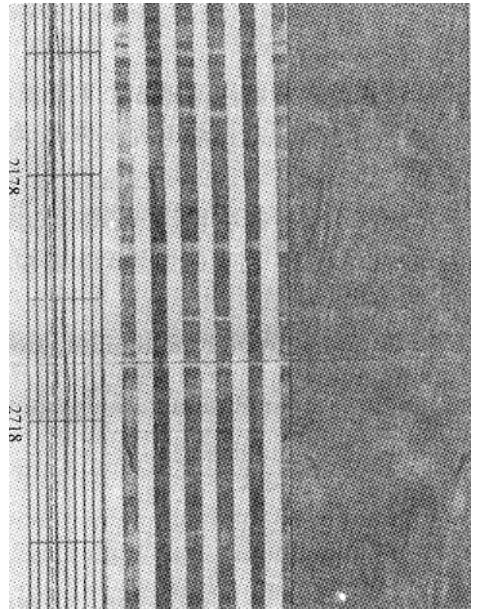


图 4 大 11 井高角度裂缝声波成像测井图

Fig.4 Acoustic televiewer log of high-angle fractures in well D11

① 康毅力，等. 鄂北低压致密砂岩气藏钻井完井保护技术研究 [R]. 2003.

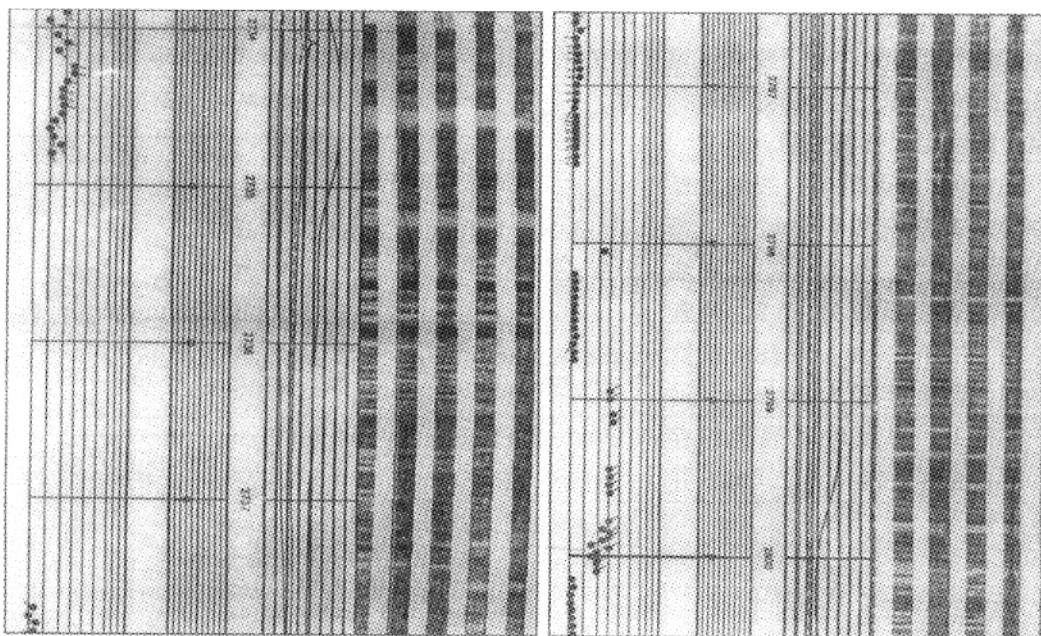


图5 大13井山二、太二段高角度裂缝

Fig.5 Acoustic televiwer log of high-angle fractures of well D13

新生代扭张型周缘断陷盆地6个主要演化阶段^[2]。在历次的构造运动中,以燕山期构造运动和喜山期构造运动对盆地上古生界和中生界储层的改造作用最强^①。因此,对于地处鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东北部的塔巴庙地区,地层低幅度形变和上古生界储层裂缝系统的形成不可避免地受控于中、新生代盆地远场应力场作用。研究表明,盆内燕山期区域挤压应力作用方向为NW—SE,而喜山期最大主压应力方向为NNE—SSW。现今应力作用方向为NEE向。见表3。

表3 塔巴庙地区自燕山期以来最大主应力方向的演化

Table 3 Evolution of the maximum principal stress directions since the Yanshanian in the Tabamiao area

主要构造运动期		燕山期	喜山期	现今
最大主应力轴产状	走向	130°~310°	30°~210°	80°~260°
	仰角	2°~4°	1°~2°	10°~30°

塔巴庙地区上古生界砂岩储层中裂缝发育表现出如下特点:裂缝系统主要为垂直缝,次为斜交缝,裂缝发育广泛,具有一定的区域性。走向以NW向至近EW向为主,其次为NEE和NE向。这与盆内不同期次最大水平主应力方位相一致,说明区域应力对鄂尔多斯盆地北部致密砂岩气藏中天然裂缝的形成具有良好的控制作用。

3.2 差异压实作用

鄂尔多斯盆地构造演化过程中一大显著特点是隆坳相间发育,伊盟隆起、北部的乌审旗隆起及东部隆坳相间带的榆林隆起,中部隆起北部与伊盟隆起之间的凹陷带、后来大陆裂谷

① 周新桂,等.鄂北塔巴庙地区构造应力场、裂缝系统定量预测与天然气有利勘探区评价[R].2003.

发育阶段榆林北出现的兴县凹陷，这些隆起及凹陷对整个鄂尔多斯盆地北部沉积厚度起到继承性的控制作用，在沉积过程中，隆起部位的沉积厚度较凹陷处薄。在刚性基底的古构造基础上，随着沉积、埋深不断加大，压实作用不断增强，同时，鼻隆高点处压实率要明显大于翼部及凹陷处，这样，在重力垂向挤压作用下顶部压薄的同时顶部沉积物会发生侧向运移，当垂向压薄及侧向挤压作用进一步加强时，就产生裂缝。在塔巴庙地区鼻状挠曲构造带的轴线部位所钻取的岩样中发现发育高角度、开度较大、延伸较远的裂缝，也进一步证实了这一点。分析认为，由于差异压实作用而产生的裂缝主要集中在鼻状隆起构造的顶部及翼部（图6）。

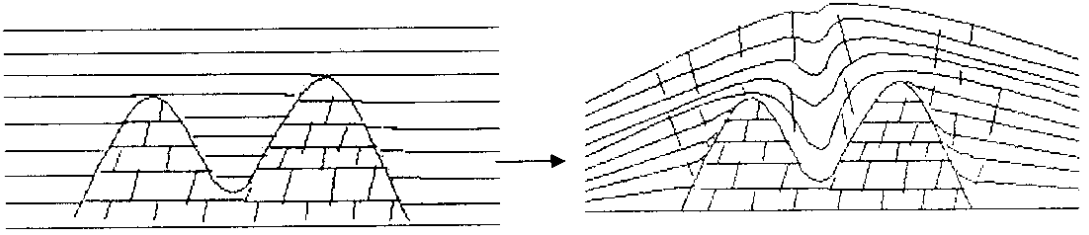


图6 古隆起控制作用下差异压实产生裂缝

Fig.6 Fractures caused by palaeoplit-controlled differential compaction

3.3 高压流体作用

在异常高流体压力作用下致密砂岩气藏中能够产生裂缝。下面主要从粘土矿物热脱水增压作用及生烃增压作用来讨论裂缝的形成过程。

(1) 粘土矿物热脱水增压，泥页岩中粘土矿物的热脱水作用主要发生在晚成岩作用 A 期，这一阶段的主要成岩作用事件有：压实作用继续进行、原生粒间孔大量减少、次生孔隙开始形成、大部分石英次生加大。此时，大量的地层水已被压实排出，研究区砂岩致密的背景已经形成，白垩纪鄂尔多斯盆地经历的热事件使古地温达 90°C 以上^[3,4]，蒙脱石、伊利石等粘土矿物进入到吸附水热脱失阶段，大量脱失的吸附水在高压作用下膨胀突破泥页岩自身的封隔条件形成裂缝，热脱失吸附水通过裂缝进入砂岩储层的缩小粒间孔及次生孔隙中，随压实作用及粘土矿物热脱水作用的继续进行，泥页岩脱失吸附水后转而成为致密的封隔层，吸附水在高温作用下膨胀，有机质开始进入成熟阶段，天然气的生成会促进异常高压进一步加强，在燕山运动对盆地的抬升、挤压作用下孔隙中的高压流体突破致密盖层的封隔形成裂缝。

(2) 生烃增压，优质及厚度巨大的烃源岩为天然气的生成提供了条件^[5,6]，鄂尔多斯盆地区域性煤层厚度为 $10\sim 20\text{m}$ ，北部煤层可达 30m 以上。在晚成岩作用 B 期，古地温达到 140°C ，使盆地的热演化程度偏高，有机质进入高成熟阶段 ($R_o = 1.2\sim 2.0$)，烃源岩中大量生成的天然气通过裂缝向临近的砂岩储层进行初次运移，随烃类聚集量的增加以及在上覆盖层的封隔作用下，储集层中的压力不断上升，压力超过封隔层的破裂压力后即产生大量微裂缝。一旦压力得以释放，微裂缝趋于闭合，封隔层再次成为遮挡条件。在积压—释压—积压反复出现的情况下，微裂缝不断地生成与闭合。在塔巴庙地区致密砂岩气藏中，封隔层附近及其以下层段，煤、泥岩及细砂岩与岩性较好的中—粗砂岩交界处，常常可见垂直裂缝发育，从多数裂缝无充填物来看，裂缝主要是在干气生成阶段形成的。

3.4 构造作用

在现今鄂尔多斯盆地北部整体构造平缓的格局上,不可忽略盆地由奥陶纪—侏罗纪西高东低的格局转向现今东高西低的背景这一过程。在古今构造格局转换过程中,侏罗纪末的燕山运动起了很大的作用,而且在抬升作用过程中在西倾单斜的背景上叠加了一系列的小型鼻隆^[7](图7),这些鼻隆的形成与盆地东北部经历的强烈挤压和抬升作用有关,伴随抬升和

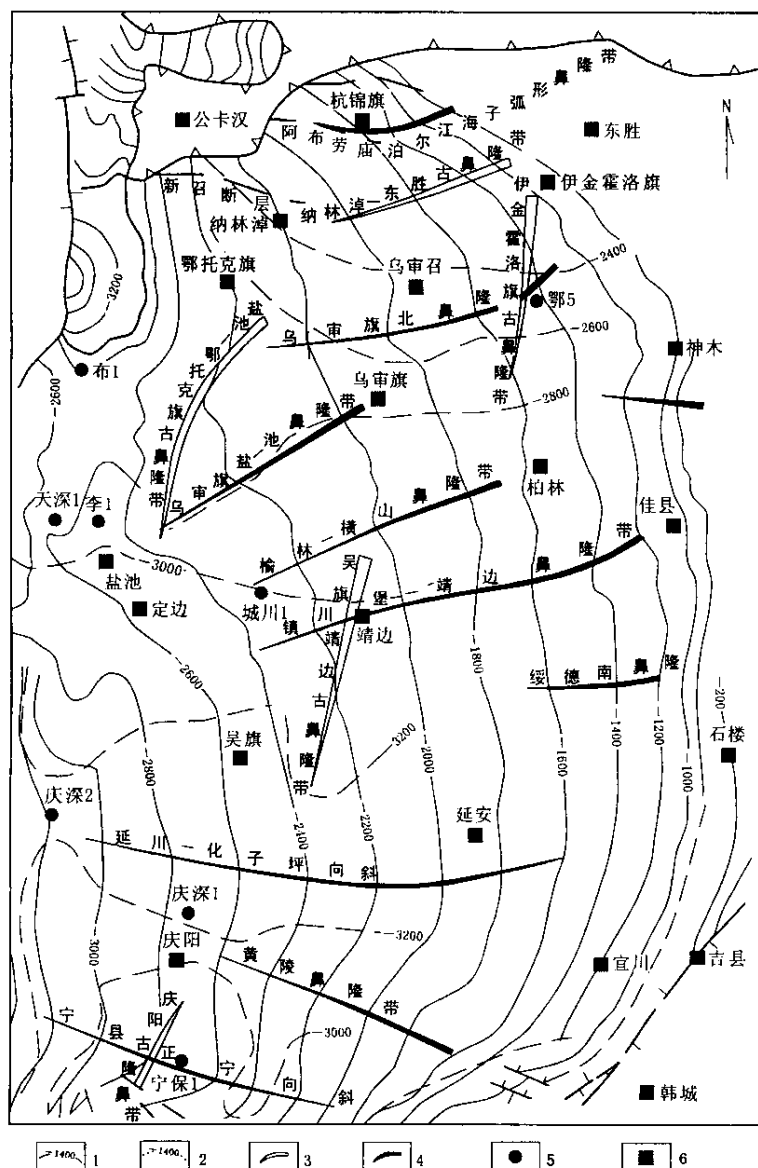


图7 鄂尔多斯盆地古鼻隆及现今鼻状隆起示意图(据闵琪等2000,修改)

Fig.7 Paleo-structural nose and present structural nose in the Ordos basin

1. T_0 构造等高线 (m); 2. T_1-T_3 古构造等厚线 (m);

3. 侏罗纪末古鼻隆起; 4. 白垩纪以来古鼻隆起; 5. 井位; 6. 居民点

挤压作用在鼻隆的翼部形成裂缝。与此同时，鼻隆发育带也不乏局部小断层的出现，其中塔巴庙鼻状隆起带上发育的宫泊沟构造较为典型（图 8）。宫泊沟构造为一个 NW 向的小型低幅度背斜构造，背斜西南翼部发育 3 条小型张性正断层。在局部构造的拉张或挤压作用下，微裂缝的发育程度有所提高，宫泊沟构造带上的大 6 井裂缝较为发育，与构造带的断裂作用有很大的关系。值得注意的是，研究局部构造时应当结合构造演化史进行，因为古构造对后期裂缝的形成具有继承性影响。

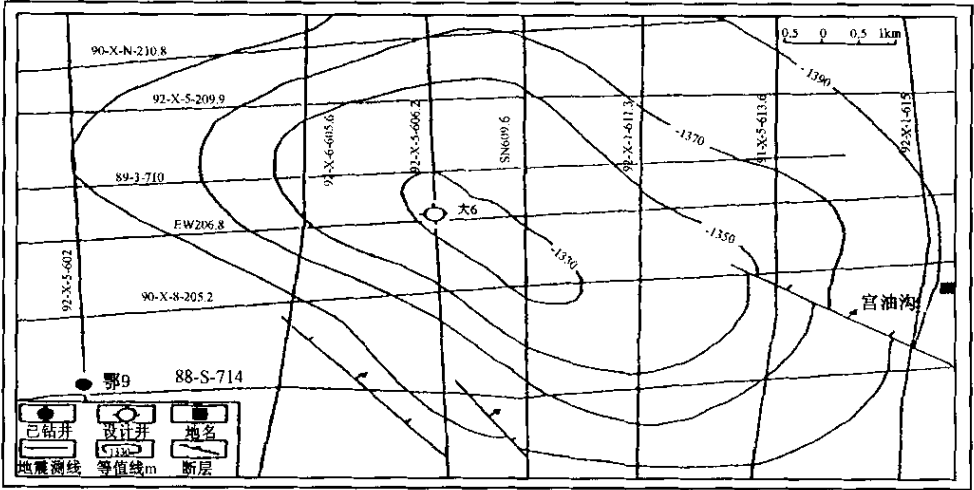


图 8 宫泊沟构造上的局部小断层

Fig.8 Small local faults in the Gongbogong structure

4 结论

鄂北塔巴庙地区低压致密砂岩储层中不同程度发育天然裂缝，其中以垂直缝和高角度缝为主，也可见小规模水平缝或低角度缝。通过对裂缝的形态、产状、密度及裂缝分布范围的分析，结合区域构造背景、地应力场演化特征和沉积地质条件，认为天然裂缝主要是在区域应力、差异压实和异常高流体压力综合作用下形成的，断裂作用不是该区裂缝发育的主导因素。

致密砂岩背景下，天然裂缝的存在可以改善储层渗流条件，提供油气聚集的有利区带，对致密砂岩气藏的开发将发挥重要作用。同时加强天然裂缝研究，对储层压裂改造和水平井开发技术也将产生积极的指导意义。

参 考 文 献

[1] 张守谦, 顾纯学. 成像测井技术及应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
 [2] 王同和, 韩宇春, 李红军. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气聚集 [A]. 见: 张功成, 徐宏等著. 中国含油气构造 [M]. 石油工业出版社, 1989, (1): 261 ~ 290.
 [3] 郑旭明, 李 良, 刘德汉. 应用矿物包裹体研究鄂尔多斯盆地古生界热史和油气演化阶段 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16 (1): 47 ~ 50.
 [4] 孙少华, 李小明, 龚革联, 等. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究 [J]. 科学通报, 1997, 42 (3): 306 ~ 309.

- [5] 夏新宇. 碳酸盐岩生烃与长庆气田气源 [M]. 北京 : 石油工业出版社 , 2000.
- [6] 李振铎. 鄂尔多斯盆地上古生界深盆气研究 [J]. 天然气工业 , 1998 , 18 (3) : 10 ~ 16.
- [7] 闵琪, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移聚集特征 [J]. 石油勘探与开发 , 2000 , 27 (4) : 26 ~ 29.

MECHANISM OF NATURAL FRACTURE FORMATION IN THE UPPER PALEOZOIC TIGHT SAND GAS RESERVOIRS IN THE TABAMIAO AREA , NORTH ORDOS BASIN

XING Zhen-hui¹ , CHENG Lin-song¹ , ZHOU Xin-gui² , KANG Yi-li³ , ZHANG Lin-yan²

(1. *Petroleum University , Beijing 102200 ; 2. Institute of Geomechanics ,*

Chinese Academy of Geological Sciences , Beijing 100081 ; 3. Southwestern College of Petroleum , Chengdu , Sichuan 610500)

Abstract : It is very hard to develop effectively the Upper Paleozoic low-pressure , low-porosity , low-permeability tight sand gas reservoir in the Tabamiao area , northern Ordos basin . The existence of natural fractures in tight gas sand can change the situation dramatically by improving greatly the permeability of the tight sand reservoir . The study of the development and distribution of natural fractures may help to determine the design of hydraulic stimulation and horizontal drilling program in tight gas development . The Tabamiao block is located on a slope in the north of the Ordos basin , and the strata occur as a gentle monoclinical structure with a stratigraphic dip angle of only 1° and it is generally thought that they have no conditions for natural fracture growth . However , many vertical fractures and high-angle fractures have been found through core observations , thin-section analysis and tests of physical properties , as well as well testing and logging . Studies of the shape , attitude , density and distribution of natural fractures indicate that natural fractures result from combined effects of the tectonic stress , differential compaction and very high fluid pressure , whereas faulting is the leading factor responsible for the development of the natural fractures in the area .

Key words : Ordos basin ; Tabamiao area ; tight gas reservoirs ; natural fracture , mechanism