

文章编号: 0253-9985(2000)03-0252-04

## 和田河气田奥陶系碳酸盐岩裂缝

杨 威<sup>1</sup>, 王清华<sup>2</sup>, 赵仁德<sup>2</sup>, 刘效曾<sup>2</sup>

(1. 石油勘探开发研究院廊坊分院天然气所, 河北廊坊 065007;

2. 塔里木石油勘探开发指挥部勘探开发研究院, 新疆库车 841000)

摘要: 和田河气田奥陶系碳酸盐岩中发育 3 类成岩缝和 5 期构造缝。裂缝以高角度小-微缝为主, 多数裂缝被方解石和泥质充填或半充填。缝合线和 2, 3, 4, 5 期构造缝尚存在未被充填的空间, 可作为油气的储集空间和渗流通道。裂缝是储层渗透率的主要贡献者, 总渗透率的 99.4% 为裂缝提供。裂缝的发育程度主要受控于构造运动和岩性, 而与不整合面和地层负荷关系不大。

关键词: 裂缝; 控制因素; 裂缝渗透率; 碳酸盐岩; 和田河气田; 塔里木盆地

第一作者简介: 杨威, 男, 28 岁, 硕士, 碳酸盐岩沉积学和储层地质

中图分类号: P618.130.2<sup>+</sup>1 文献标识码: A

塔里木盆地油气勘探实践证明, 寻找奥陶系潜山油气藏, 成功的关键是寻找裂缝发育带, 因此裂缝的系统研究是十分重要的课题。和田河气田位于巴楚凸起玛扎塔格断裂构造带上<sup>[1]</sup>。据已完钻的 9 口井统计, 其储层平均孔隙度为 1.95%, 平均渗透率为  $2.38 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 是低孔低渗性碳酸盐岩储层; 主要储集空间为溶孔、溶洞和裂缝, 形成裂缝-孔洞型或孔洞-裂缝型储层。

## 1 类型

## 1.1 成岩缝

## 1.1.1 成岩收缩网状缝

形成于成岩早期, 呈不规则网状, 宽度一般几微米, 被方解石充填。主要分布于泥晶灰岩和泥质条带中, 是由于以灰泥基质为主的沉积物颗粒中含水饱和度高, 成岩过程中脱水收缩而形成的。

## 1.1.2 岩溶缝

是在早期构造缝或地层薄弱部位发育起来的溶蚀扩大缝和溶沟, 形态不规则, 缝壁不平整, 溶蚀

现象明显。此类缝出现在表生期和埋藏期, 表生期岩溶缝多为泥质或细、粉屑全充填, 埋藏期岩溶缝多为中-粗晶方解石、石膏充填。

## 1.1.3 缝合线

形成于晚成岩期深埋阶段, 是压强增大、碳酸盐岩发生局部溶解产生的。主要表现为碳酸盐岩颗粒或晶面形成弯曲并呈镶嵌状。岩芯观察发现其与岩石层理平行或近于平行, 峰柱垂直于层面, 缝宽 2~3 mm, 多分枝, 呈齿状镶嵌, 峰柱起伏较大, 可达 2 cm, 多为灰绿色含有机质丰富的泥质充填。

## 1.2 构造缝

通过对普通薄片、铸体薄片和岩芯的观察, 根据裂缝的产状、充填物的阴极发光、流体包裹体特征和互相间切割关系, 可将整个裂缝系统分为 5 期。研究区奥陶系沉积以来, 先后经历了 5 次大的构造运动<sup>[2]</sup>, 根据每期裂缝的特征和构造运动形成的时间, 推测这 5 期裂缝可能与 5 次大的构造运动相对应(表 1)。

表 1 不同期次的构造裂缝特征

Table 1 Characteristics of structural fractures in different stages

| 期次 | 充填物      | 宽度/mm      | 产状     | 阴极发光  | 包裹体特征             |                          | 有效性 | 形成时期  |
|----|----------|------------|--------|-------|-------------------|--------------------------|-----|-------|
|    |          |            |        |       | 大小/ $\mu\text{m}$ | 均一温度/ $^{\circ}\text{C}$ |     |       |
| 1  | 细粉晶方解石   | 0.1~1      | 网状或高角度 | 桔黄色   | 无                 | 无                        | 无效  | 晚加里东期 |
| 2  | 灰绿、灰黑色泥质 | 1~10       | 高角度    | 桔红色   | 无                 | 无                        | 有效  | 早海西期  |
| 3  | 方解石      | 1~10 最大 50 | 高角度    | 紫色    | 5~15              | 78.9                     | 有效  | 晚海西期  |
| 4  | 方解石      | 1~10 最大 30 | 高角度    | 橙黄-深蓝 | 10~25             | 113.8                    | 有效  | 印支期   |
| 5  | 多张开      | <1         | 产状不定   | 无     | 无                 | 无                        | 有效  | 喜山期   |

第 1 期裂缝发育较早, 可能是加里东晚期构造运动的产物。呈网状或高角度状( $> 70^{\circ}$ ), 被细、粉

晶方解石全充填, 阴极发光呈桔黄色, 被后期多组裂缝切割。

第2期裂缝可能是早海西运动的产物。以近于直立的高角度缝为主, 缝宽1~10 mm, 缝壁较弯曲, 充填灰绿、灰黑色泥质, 部分泥质被油质浸染。

第3期裂缝可能是晚海西运动的结果。以高角度缝为主, 缝宽1~10 mm, 最大可达50 mm, 多为方解石充填或半充填, 阴极发光呈紫色。晶体明亮, 含大量的单相水溶液包裹体, 大小一般为5~15  $\mu\text{m}$ , 无色, 不规则状, 气液比为5%~10%, 均一温度为53.6~100.7  $^{\circ}\text{C}$ , 平均为78.9  $^{\circ}\text{C}$ 。

第4期裂缝可能是印支运动的产物。宏观特征同第3期, 充填的方解石阴极发光呈橙黄-桔黄色及深蓝-橙红色。晶体较明亮, 多为粗晶, 含黑色沥青和气态烃两相包裹体, 大小一般为10~25  $\mu\text{m}$ , 浅灰褐色, 不规则状, 气液比为10%~25%, 均一温度为101.6~133.0  $^{\circ}\text{C}$ , 平均为113.8  $^{\circ}\text{C}$ 。

第5期裂缝主要与喜山运动有关。其裂缝的产状不定, 缝宽一般小于1 mm, 未被充填, 切割前4期裂缝和缝合线, 也曾发生过溶蚀扩大, 具有明显的溶蚀边缘, 是碳酸盐岩储层的主要储集空间和渗滤通道。

第3,4期裂缝方解石充填物的K, Na含量极低, 分别为0~0.01 mg/kg, 碳氧同位素值同围岩相

比, 明显偏负,  $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB}) = -0.15\text{‰} \sim -0.048\text{‰}$ , 平均为 $-0.077\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}) = -0.633\text{‰} \sim -0.818\text{‰}$ , 平均为 $-0.717\text{‰}$ , 由盐度指数公式 $Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50)$ 计算,  $Z$ 平均为122.83, 围岩的 $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $Z$ 平均值分别为0.437‰、 $-0.328\text{‰}$ 、134.54, 说明其为埋藏较深环境下的产物, 水溶液的盐度较低。两组裂缝都被这类方解石充填或半充填, 半充填留下的空隙为碳酸盐岩储层的主要储集空间之一。

第2,3,4,5期裂缝都存在未充填的空间, 这些空间可能是裂缝被溶蚀扩大未被充填(第5期), 也可以是方解石未全充填留下的空间、方解石中的晶间孔(第3,4期), 还有泥质充填物中的微空隙(第2期)。这些空间基本上都有沥青或残余的油质, 说明这些空间已成为油气的储集空间和油气运移的通道。

## 2 特征

通过对研究区7口井(玛2、玛3、玛4、玛5、玛7、玛8、玛401井)403.04 m奥陶系岩芯的观察统计和岩石薄片微缝的观察, 发现裂缝型式复杂多样, 裂缝产状、性质、充填情况、开启程度各不相同(图1)。

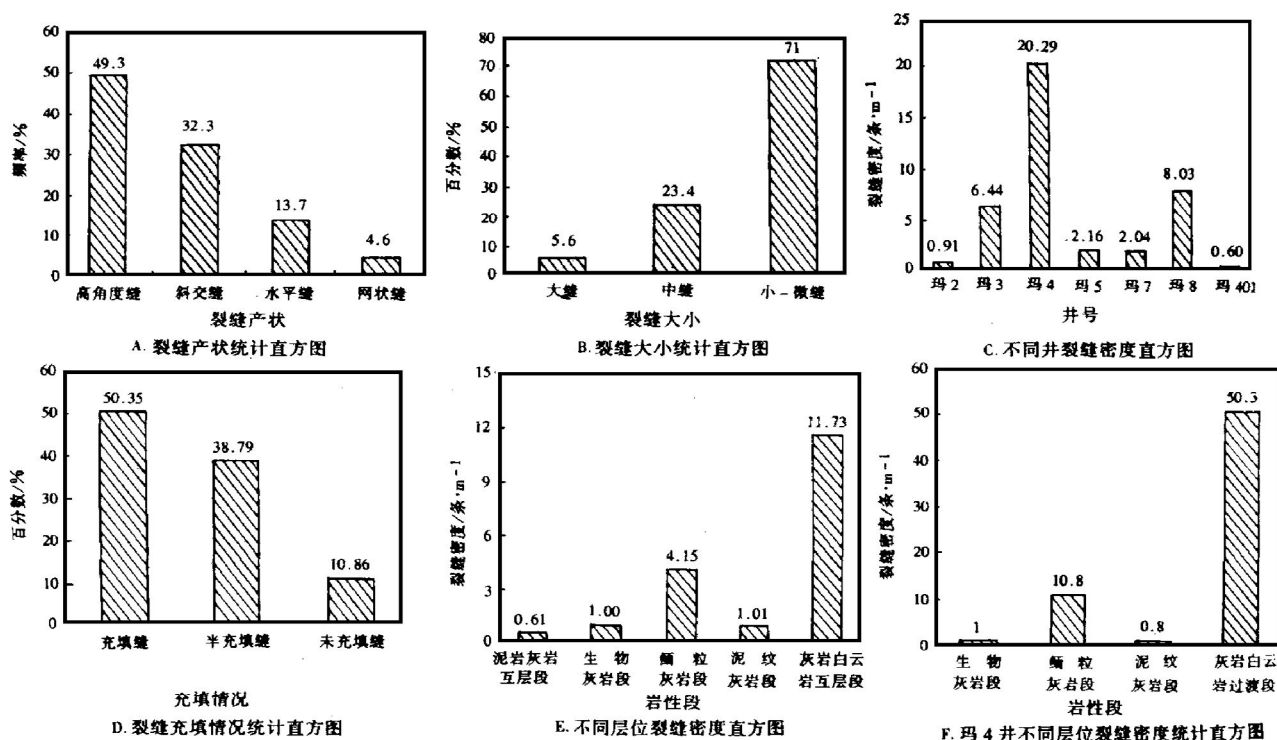


图1 裂缝发育特征统计直方图

Fig. 1 Histogram of fracture characteristics

研究过程中,共统计岩芯裂缝 1 593 条/段(网状缝为段),由于极少数裂缝发育部位岩芯破碎,致使少量微-细缝没有统计全,但其数量少,对研究结果影响不大。从裂缝产状看,以高角度缝和斜交缝为主,所占的比例达 49.3 %和 32.3 %;水平缝和网状缝数量较少,仅占总数的 13.7 %和 4.6 % (图 1-A)。从裂缝大小上看,以小-微缝为主,占裂缝总数的 71 %;中缝达 23.4 %;大缝最少,仅 5.6 % (图 1-B)。从裂缝充填程度看,以充填缝为主,所占比例为 50.35 %,半充填缝为 38.79 %,未充填缝仅占 10.86 % (图 1-C)。从裂缝发育程度上看,不同井、不同层位差别很大,如玛 4 井裂缝密度平均为 20.29 条/m,而相邻的玛 401 井仅 0.6 条/m (图 1-D);层位上,以灰岩白云岩过渡段最为发育,裂缝密度平均达 11.73 条/m,最不发育的灰岩泥岩互层段仅 0.61 条/m (图 1-E, F)。

3 控制因素分析

3.1 不整合面

奥陶系与上覆石炭系呈角度不整合接触。所钻遇的奥陶系有 3 个岩性段和不整合面接触,分别是泥岩灰岩互层段(玛 5、玛 7、玛 401 井)、生物灰岩段(玛 2、玛 4 井)和灰岩白云岩过渡段(玛 3、玛 8 井)。统计发现各井不整合面下岩性段的裂缝密度几乎都小于该岩性段的平均值(表 2),说明不整合

表 2 不整合面以下各井各岩性段裂缝密度统计表  
Table 2 Statistics of fracture density of different lithologic sections of wells under unconformity

| 井号    | 岩性段      | 裂缝密度/条·m <sup>-1</sup> | 该岩性段平均裂缝密度/条·m <sup>-1</sup> |
|-------|----------|------------------------|------------------------------|
| 玛 2   | 生物灰岩段    | 0.4                    | 1.0                          |
| 玛 3   | 灰岩白云岩过渡段 | 6.47                   | 20                           |
| 玛 4   | 生物灰岩段    | 1                      | 1.0                          |
| 玛 5   | 泥岩灰岩互层段  | 0.5                    | 0.64                         |
| 玛 7   | 泥岩灰岩互层段  | 2                      | 0.64                         |
| 玛 8   | 灰岩白云岩过渡段 | 4.7                    | 20                           |
| 玛 401 | 泥岩灰岩互层段  | 0.1                    | 0.64                         |

面下的岩溶作用对裂缝的贡献不大,亦说明地表岩溶作用没有大量产生裂缝。

3.2 构造运动

前已述及,研究区 5 期裂缝可能是 5 次大的构造运动的结果,每次运动产生的裂缝特征各不相同(表 1)。越古老的构造运动产生的裂缝被后来的运动改造得越厉害,被充填得越严重,余下的储集空间越少。

玛扎塔格构造带是喜山期后才定型的断背

斜<sup>[3]</sup>,其裂缝发育程度与其构造部位、构造曲率有关系,如玛 4 井与玛 401 井相邻,玛 401 井位于构造边部,其裂缝密度比玛 4 井要小得多,而且小于基本处于构造中部的其余各井的裂缝密度。根据钻井资料校正得到的局部构造目的层的构造图及根据局部构造长短轴和构造等值线的疏密程度估算的局部构造的曲率可知,构造曲率与裂缝发育程度有正相关关系<sup>[4]</sup>。在该区研究过程中,把位于构造高点的井(玛 2、玛 3、玛 4、玛 5 和玛 8 井)的奥陶系顶面的构造曲率估算出来,与该井裂缝密度相对比,发现局部构造曲率与裂缝的发育程度关系密切,呈较明显的正相关关系(图 2)。

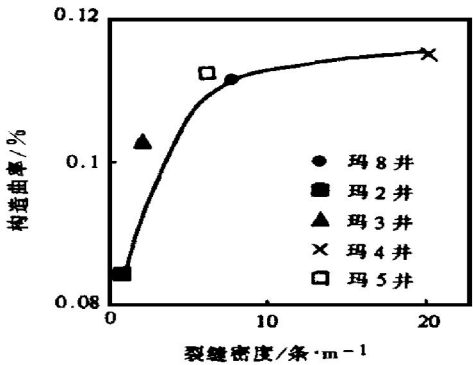


图 2 裂缝密度和构造曲率关系图

Fig. 2 Relationship between fracture density and structural curvature

3.3 岩性

统计资料显示,裂缝在灰岩白云岩过渡段最发育,其平均裂缝密度比别的岩性段大几倍,其次为鲕粒灰岩、生物灰岩;泥纹灰岩与泥岩灰岩互层段裂缝密度最小(图 1-E, F)。这是由于岩石脆性不同产生的结果,脆性大的岩石易发生碎裂。白云岩脆性比灰岩大,灰岩比泥岩大;颗粒大、颗粒含量高的岩石脆性大。因此,在相同的构造应力作用下,灰岩白云岩过渡段产生的裂缝多,鲕粒灰岩和生物灰岩比泥纹灰岩和泥岩灰岩互层段产生的裂缝多。

3.4 地层负荷

塔里木盆地经过了多期的抬升剥蚀,可使原有的成岩缝和构造缝通过应力释放、体积膨胀产生新的裂缝<sup>[4]</sup>,但研究区现今奥陶系埋深差别小,最大为 820 m,一般为 200~300 m。而且顶界埋深最大的玛 7 井的裂缝密度比玛 2、玛 401 井大,比其余各井小;埋深最浅的玛 3 井的裂缝密度比玛 4、玛 8 井小,比其余各井大(图 1-D),说明地层负荷对裂缝发育程度的影响不明显。

## 4 与油气的关系

裂缝对储层的贡献主要表现在裂缝对储层总孔隙度和总渗透率的贡献。通过利用测井技术测定裂缝孔隙度和渗透率的方法<sup>[5]</sup>,得到了裂缝孔隙度和渗透率如表3所示。

表3 奥陶系储层物性参数平均值

Table 3 Average values of physical property in Ordovician reservoirs

| 参 数                           | 井 别   |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 玛401井 | 玛5井   | 玛4井   | 玛8井   |
| 厚度/m                          | 49.5  | 86.88 | 78.0  | 61.65 |
| 孔隙度/%                         | 2.41  | 3.0   | 2.48  | 2.08  |
| 裂缝孔隙度/%                       | 0.056 | 0.08  | 0.087 | 0.032 |
| 渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$   | 2.538 | 2.686 | 3.530 | 2.212 |
| 裂缝渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$ | 2.524 | 2.67  | 3.515 | 2.2   |
| 基质渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$ | 0.014 | 0.016 | 0.015 | 0.012 |
| 裂缝孔隙度/总孔隙度/%                  | 2.3   | 2.6   | 3.5   | 1.5   |
| 裂缝渗透率/总渗透率/%                  | 99.4  | 99.4  | 99.5  | 99.4  |

由表3可知,裂缝孔隙度占总孔隙度的1.5%~3.5%,而裂缝渗透率占总渗透率的99.4%左右,说明裂缝对储层的贡献主要表现在渗透率上。由于裂缝的存在,大大提高了储层的渗透性。经测定,区内碳酸盐岩储层基质的渗透率仅为 $0.014 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 左右,如果没有裂缝,不可能成为有效的储层。

另外,通过铸体薄片观察发现压溶作用形成的缝合线多被泥质半充填,存在许多缝洞和泥质微孔,这些空间多被油质浸染(表4)。说明大部分缝合线是油气的储集空间和渗流通道。

## 5 结论

(1) 研究区奥陶系碳酸盐岩主要发育3类成岩

缝5期构造缝。各类裂缝的形成时间、大小、充填程度等特征各不相同。

表4 部分铸体薄片缝合线统计表

Table 4 Statistics of sutures in some casting slices

| 参 数 | 薄片数 | 缝合线数 | 油质浸染数 |
|-----|-----|------|-------|
| 玛2井 | 10  | 4    | 4     |
| 玛3井 | 4   | 6    | 5     |
| 玛4井 | 9   | 24   | 14    |

(2) 裂缝以高角度微-小缝为主,多被方解石和泥质充填,裂缝发育程度随井所在的构造部位的不同而不同。

(3) 裂缝为储层提供99.4%的渗透率,是致密碳酸盐岩能成为油气储层产层的必要条件。

(4) 裂缝的发育程度主要受控于构造运动和岩性,与不整合面和地层负荷关系不大。

## 参 考 文 献

- 贾承造,姚慧君,魏国齐,等.塔里木盆地板块构造演化和主要构造单元地质构造特征[A].见:童晓光,梁狄刚.塔里木盆地油气勘探论文集[C].乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1992. 207~225
- 贾承造,魏国齐,姚慧君,等.盆地构造演化与区域构造地质[A].见:童晓光,梁狄刚.塔里木盆地油气勘探丛书[C].北京:石油工业出版社,1995. 88~98
- 谢晓安,胡素云,卢华复.探讨塔里木盆地巴楚断隆的正反转构造[J].地质论评,1998,44(1):1~5
- 郭光辉,李建军,卢玉红.塔中I号断裂奥陶系灰岩裂缝特征探讨[J].石油学报,1999,20(4):19~23
- 谭廷栋.裂缝性油气藏测井解释模型与评价方法[M].北京:石油工业出版社,1987. 1~22

## FRACTURES OF ORDOVICIAN CARBONATE ROCKS IN HETIAN RIVER GASFIELD

Yang Wei<sup>1</sup> Wang Qinghua<sup>2</sup> Zhao Rende<sup>2</sup> Liu Xiaozhen<sup>2</sup>

(1. Natural Gas Department of Langfan Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang, Hebei;

2. Research Institute of Tarim Petroleum Exploration and Development Headquarters, Korla, Xinjiang)

**Abstract:** Three sorts of diagenetic fractures and five stages of structural fractures developed in Ordovician carbonate rocks in Hetian River Gasfield. Their characters of development time, attitude, scale, packing degree and so on are different each other. The fractures are characterized by high angle and small-micro fractures, most of them are filled by mud and calcite. The suture and 2~5 stage structural fractures contain spaces for hydrocarbon preservation and migration. Fractures are the principal contributors of permeability (supplying 99.4% of total permeability), and it is the main cause for carbonate rocks to be efficient reservoirs. development degree of fractures was controlled by lithology and tectonic movement.

**Key words:** fracture; controlling factor; fracture permeability; carbonate rock; Hetian River Gasfield; Tarim Basin