

文章编号 :1000-0550(2001)04-0536-05

# 长庆气田马五<sub>1</sub> 储层裂缝特征及控制因素探讨

王彩丽<sup>1</sup> 孙六一<sup>1</sup> 王琛<sup>1</sup> 王鸿章<sup>2</sup>

(长庆石油公司勘探开发研究院 西安 710021) (长庆石油勘探局井下工程作业处 甘肃庆阳 745101)

**摘要** 长庆气田主力气层为马五<sub>1</sub>,其储层中裂缝类型主要有垂直缝、斜交缝、水平缝及网状缝。虽然马五<sub>1</sub>储层中裂缝类型多,破裂期次多,但对储层渗流作用有较大影响的裂缝主要有两大类,即构造破裂裂缝和风化破裂裂缝。马五<sub>1</sub>储层的裂缝形成期主要有三期,第一期为加里东期,形成各类风化缝;第二期为燕山中期构造运动,是一次重要的构造破裂期;第三期为燕山晚—喜山早期构造运动。通过对裂缝形成的地质因素研究得出:风化缝主要与风化岩溶作用形成地貌条件有关,其次与岩层产状等因素有关,构造缝的形成与古应力场条件及岩石本身的力学属性有关。

**关键词** 裂缝类型 破裂期次 构造缝 风化缝 长庆气田

**第一作者简介** 王彩丽 女 1963 年出生 工程师 天然气开发地质

中图分类号 TE122.2 文献标识码 A

长庆气田马五<sub>1</sub> 主力气层以裂缝—溶孔型为主,储层裂缝发育程度对气井产能有明显影响。“八五”科技攻关中的裂缝研究,按成因将马五<sub>1</sub> 储层裂缝分为与岩溶、构造、成岩及沉积—构造作用有关的四种类型。依形成前后分为四期,即:成岩缝、压溶缝、早期构造缝和古岩溶缝,并认为有效缝为风化缝、晚期构造缝与网状缝。本文在前人研究成果的基础上,采用多种方法,通过大量岩芯观察,应用裂缝识别等特殊测井方法,将马五<sub>1</sub> 储层裂缝按产状分为垂直缝、斜交缝、水平缝及网状缝,并指出了裂缝组系方向。从裂缝充填物成分、碳、氧同位素及其它地球化学特征着手,结合区域构造演化特征研究表明,马五<sub>1</sub> 储层裂缝形成期次主要有三期,钻井资料证实,对储层渗流作用有较大影响的裂缝主要是构造缝和风化缝。该项研究明确了马五<sub>1</sub> 储层裂缝成因类型、形成期次,搞清了裂缝控制因素及分布规律。虽然马五<sub>1</sub> 储层类型为裂缝—孔洞型,但其裂缝的分布对沟通溶孔,提高储层渗流能力有着十分重要的意义。

## 1 裂缝成因类型及形成期次

### 1.1 裂缝类型

通过对气田马五<sub>1</sub> 地层近 140 口井的岩芯观察及裂缝描述统计,并按岩芯上裂缝的产状可以分为垂直缝、斜交缝、水平缝及网状缝。

#### 1.1.1 垂直缝

指裂缝沿岩芯轴向平行分布的裂缝。有张开、半充填和全充填三种形式,规模大小不一。其成因主要

有构造成因垂直缝和风化破裂垂直缝两种,前者主要是由晚期(燕山—喜山期)构造应力作用形成的张破裂和早期“X”剪破裂,后者是由风化期岩溶塌陷或表面机械、物理化学等原因所形成。垂直缝的宽度和长度分布见图 1a 和图 1b。

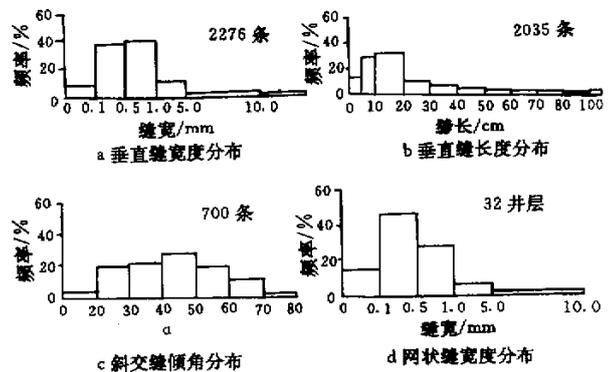


图 1 不同类型裂缝产状(要素)的频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of different types of fractures

#### 1.1.2 斜交缝

岩芯上按裂缝与岩芯平面的夹角可以分为低角度缝( $\alpha < 45^\circ$ )和高角度缝( $\alpha > 45^\circ$ )。马五<sub>1</sub> 储层中斜交缝相对于垂直缝要少得多。其成因也主要有构造成因和风化破裂两种,二者相比,前者所占比例较高。斜交缝的宽度比垂直缝相对要小,倾角分布见图 1c。斜交缝发育除受构造应力场及岩溶作用带控制外,还与岩性等因素有关。

### 1.1.3 水平缝

马五<sub>1</sub> 储层中岩芯的水平缝最多,其成因也是最为复杂的一种,但最为主要的成因还是构造成因的水平缝和风化成因的水平缝。由于马五<sub>1</sub> 地层处于埋深 3 000 m 以下,巨大的上覆地层压力使其呈闭合状,多为无效缝,无渗流意义,因此在统计分析时应考虑。水平缝最多见于层、纹理发育的岩层中。

### 1.1.4 网状缝、微裂隙

马五<sub>1</sub> 储层中网状缝、微裂隙发育,其成因主要有三种:

(1) 风化期网状缝和微裂隙。由于机械、物理风化、坍塌等作用形成的网状缝和微裂隙在马五<sub>1</sub> 储层中占有很重要的位置。

(2) 成岩收缩微裂隙、网状缝。在马五<sub>1</sub> 岩芯中所见到的网状缝或微裂隙总体上来讲,这类缝只占网状缝的 10%,多数已被完全充填,所以渗流意义很小。

(3) 构造成因微裂隙。由于构造作用也可以形成微裂隙,多组微裂隙也可以组成网状缝,该破裂可以叠加于早期破裂之上,由于形成期晚,充填程度较低,是马五<sub>1</sub> 储层中的有效缝。

网状缝常常无组系、不规则,其条数、长度等参数无法得到,只根据网状缝出现的井层数及随机测量的宽度统计得出,马五<sub>1</sub> 储层中岩芯网状缝宽度在 0.1 ~ 0.5 mm 所占井层最多,占 46.88%(图 1d)。网状缝发育的井层统计结果表明,马五<sub>3</sub> 段网状缝最为发育,占 33.48%;马五<sub>2</sub> 次之,占 30.38%;马五<sub>1</sub> 和马五<sub>4</sub> 段相对较少,分别占 16.71%和 19.22%。

### 1.2 裂缝组系方向

根据裂缝识别测井和地层微扫描测井识别及岩芯观察的裂缝走向,编制了研究区马五<sub>1</sub> 储层中有效裂缝走向玫瑰花图(图 2),并由图可得出如下两点认识。

(1) 马五<sub>1</sub> 储层中裂缝组系主要有 EW 向、NE 向和 NW 向三组,反映出构造缝在有效缝中占有重要的位置。

(2) 测井裂缝的主要组系方向与局部构造有一定联系,在鼻轴上的井多数有一组垂直于鼻轴的破裂和斜交鼻隆的破裂,如陕 24、23、29、5、20、34、88 等井。

### 1.3 裂缝成因类型划分

马五<sub>1</sub> 储层中裂缝成因类型多,破裂期次多,但通过储层评价研究认为对储层渗流作用有较大影响的裂缝主要有构造裂缝和风化期裂缝两大类(图 3)<sup>[1]</sup>。

#### 1.3.1 构造裂缝

这种破裂岩芯多见为垂直及斜交缝,或叠加于早期破裂之中,造成网状破裂,其特征为单条裂缝规模相对较大,可切割岩石组构和早期形成的破裂,缝面较

直,一般少见尾端分叉情况,常见方解石、石英矿物充填。主要包括构造挤压形成的早期张破裂、剪破裂及鼻隆形成后的顺轴向张破裂及晚期剪破裂。

资料分析(图 4)表明构造缝充填物的同位素可以分成两个区:

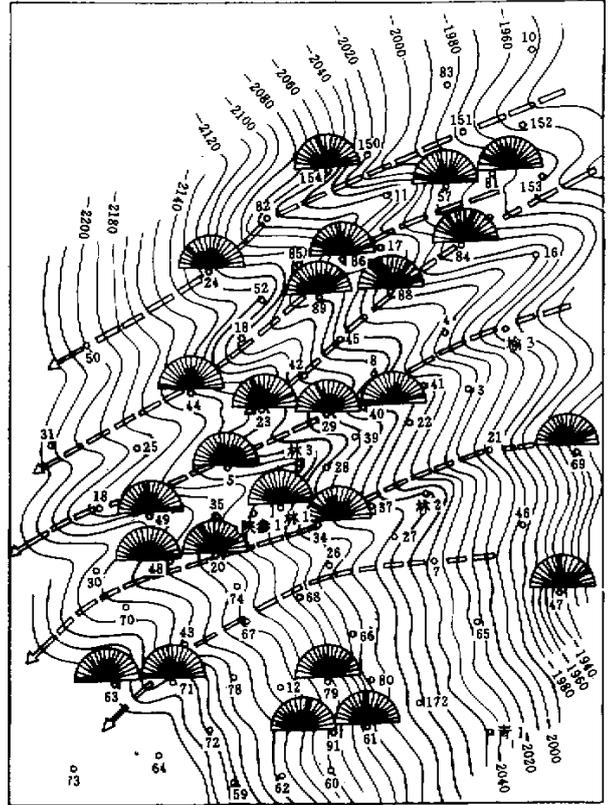


图 2 长庆气田马五<sub>1</sub> 储层裂缝走向分布图

Fig.2 Fracture trend map of Ma<sub>51</sub> reservoir in Changqing gas field

类 型	成 因	发育层位	岩 性	丰 度	充 填 程 度	典型模式
构造裂缝	构造应力有关	马五 <sub>1-4</sub>	云岩 孔云岩	有	半充填 充填	0,m <sub>51</sub> ,0,m <sub>51</sub> ,0,m <sub>51</sub> ×交岩,0,m <sub>51</sub>
风化裂缝	表层风化破裂	马五 <sub>1</sub> 马五 <sub>2</sub>	溶孔 云岩	广泛分布	充填 半充填	0,m <sub>51</sub>
	岩溶坍塌破裂	部分马五 <sub>1</sub> 主要 马五 <sub>2+4</sub>	溶孔、角砾 云岩	溶蚀坍塌带	充填 半充填	
	陡壁拉张破裂	马五 <sub>1+2</sub>	溶孔 云岩	沿沟槽分布	充填 半充填	
成岩微裂隙	成岩收缩等有关	马五 <sub>1</sub>	含灰、含泥云岩	较少	充填	

图 3 马五<sub>1</sub> 储层裂缝成因类型划分

Fig.3 Genetic type division of fractures in Ma<sub>51</sub> reservoir

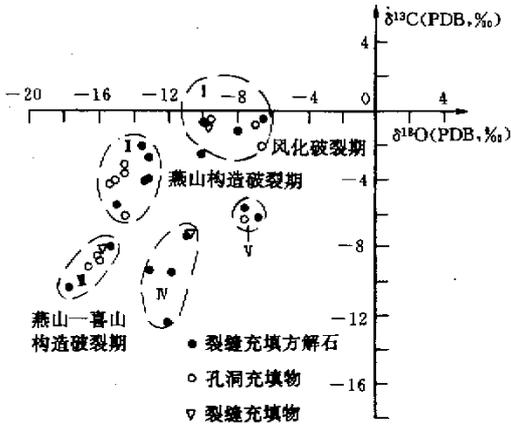


图 4 马五<sub>1</sub> 储层裂缝充填方解石碳氧同位素分布图

Fig.4 Distribution of carbon-oxygen isotopes of calcite filling in the fracture of Ma<sub>51</sub> reservoir

(1)  $\delta^{13}C$  在  $-2\text{‰} \sim -6\text{‰}$  (PDB),  $\delta^{18}O$  在  $-13\text{‰} \sim -15.5\text{‰}$  (PDB) 区, 反映了储层埋藏后由一次较为强烈的构造运动作用形成的构造破裂。

(2)  $\delta^{13}C$  在  $-8\text{‰} \sim -11\text{‰}$  (PDB),  $\delta^{18}O$  在  $-15.5\text{‰} \sim -18\text{‰}$  (PDB) 区, 反映在上一次破裂后又一次重要的埋藏构造破裂事件。

从裂缝充填物的探针成分分析成果来看, 构造期的破裂裂缝充填物与风化期也存在明显区别(表 1), 裂缝充填物的包裹体资料(表 2)也表明中晚期裂缝充填方解石形成于埋藏环境应为构造期产物。

1.3.2 风化期裂缝

马五<sub>1</sub> 储层是典型的古岩溶储层, 马家沟组顶部加里东期风化岩溶作用是形成该套古岩溶储层的主要地质因素, 并形成了各种破裂, 我们统称为风化缝。根

表 1 储层中早、中、晚期充填方解石地球化学特征

Table 1 Geochemistry characteristic of calcite filling in reservoir early mid late-stage

充填期	井号	层位	微量元素		
			Fe/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Sr/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Mn/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
早期	陕 37 井	马五 <sub>1</sub>	0	186	195
	陕 6 井	马五 <sub>4</sub>	0	342	164
	陕 2 井	马五 <sub>1</sub>	0	139	108
中期	陕 2 井	马五 <sub>1</sub>	0	800	53.1
	陕 2 井	马五 <sub>2</sub>	0	1 101	89.8
晚期	陕 2 井	马五 <sub>4</sub>	0	466	128
	陕 6 井	马五 <sub>4</sub>	0	754	316
	陕 37 井	马五 <sub>1</sub>	0	334	224

表 2 马五<sub>1</sub> 储层裂缝充填方解石包裹体拉曼光谱成分

Table 2 Laman spectrum analysis of calcite filling in the fracture of Ma<sub>51</sub> reservoir

井号	充填期	气相			液相			
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub>
陕 6 井	晚期	50.9	31.5	17.6	91	9		
陕 2 井	中期				53	26	21	

据气田地质条件可以细分几个主要亚类。

(1) 表层风化裂缝 主要在表生风化期, 由物理、机械等风化作用下形成的破裂。其特征为初期以垂直(或近垂直)的树枝状缝为主, 尾端有分叉现象, 中晚期风化破碎带则有网状破裂, 其主要因素是水的侵蚀和水成冰时的体积扩张、昼夜的温差效应、植物的根劈及裂隙中结晶析出以及矿物的扩张作用, 另外还与风化带中不稳定矿物分解和稳定矿物生成相关的生物化学反应或化学作用有关。马五<sub>1</sub> 储层中该类破裂主要分布在表面以下 15 m 范围内, 并有一定的岩性选择性。

(2) 陡壁拉张裂缝 这类裂缝主要分布于风化岩溶形成的地貌陡坎地带。这些地带由于表面风化作用形成一些微裂隙, 在这些裂隙的基础上, 在水等润滑剂存在的条件下, 由于陡坎带高部的重力势高, 在重力拉张应力作用下可以形成拉张破裂, 或垮塌形成堆积角砾岩(图 5)。这种岩溶陡坎带的垮塌拉张作用取决于岩层层面的产状、陡坎的高度、以及不同的岩性, 马五<sub>1</sub> 储层中白云岩的破裂相对较强。在实际工作中, 利用马五<sub>1</sub> 储层岩溶分布特征及马五<sub>1+2</sub> 段的岩溶地貌特征, 可以对陡坎带裂缝进行评价。

(3) 岩溶坍塌裂缝 表生期的岩溶作用可以形

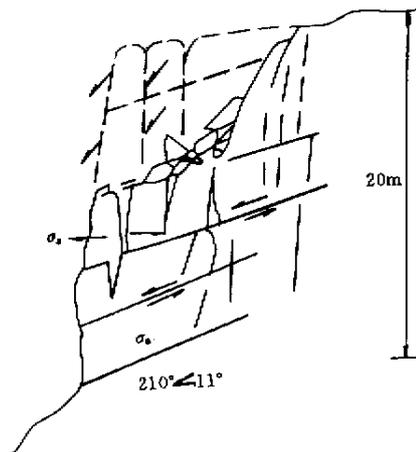


图 5 溶蚀陡壁重力拉张破裂模式

Fig.5 Model of drawing-out cracking of dissolution steepness by gravitation

成一些较大的洞穴,洞顶因地层无支撑物发生坍塌,形成坍塌层破裂或破裂堆积角砾岩。另外在坍塌坑边缘因塌陷作用拉张而形成坍塌洞穴边缘肩部破裂带,该破裂在肩部,以垂直和高角斜交缝为主,而中部则有岩溶劈裂缝、层间滑脱的各种水平、垂直、斜交缝或多种破裂组合的网状缝,如气田南区的陕12井马五<sub>1</sub><sup>2,3</sup>段均有这类坍塌缝。

(4) 成岩微裂隙 马五<sub>1</sub>储层中有一些被细晶白云石、泥质、方解石充填的微裂隙。这些裂隙破裂规模较小,多发育于泥质含量较高的泥质(泥晶)白云岩中,许多呈网格状,具明显的收缩痕迹。这些微裂隙可能属于岩石失水收缩成因的成岩缝,多被充填,且充填期早,对流体渗透无意义。

#### 1.4 裂缝形成期次

根据裂缝充填物碳氧同位素测定、包裹体光谱成分以及探针成分分析可知,马五<sub>1</sub>储层中主要有加里东期、燕山中期和燕山晚—喜山早期三期破裂。

##### 1.4.1 加里东期

储层中裂缝充填方解石具有低 Sr、Mn 特征,反映风化期的充填矿物特征;另外,裂缝充填方解石同位素  $\delta^{13}\text{C}$  在  $1\text{‰} \sim -3\text{‰}$  (PDB),  $\delta^{18}\text{O}$  在  $-6\text{‰} \sim -11\text{‰}$  (PDB) 之间,主要代表马家沟组沉积末的加里东抬升运动使马五<sub>1</sub>储层抬生暴露遭受长达 1.3~1.5 亿年的风化剥蚀而形成的各类风化缝<sup>[2]</sup>。

##### 1.4.2 燕山中期

是盆地由以前的西隆东坳构造格局转变为西洼东隆格局的发展变化时期,是一次重要的构造破裂期。本期裂缝充填方解石具有高 Sr 和低 Mn 特征,对应较早的埋藏期构造破裂。

另外,按同位素测温方程  $T(\text{°C}) = 31.9 - 5.55(\delta^{18}\text{O}_p - \delta^{18}\text{O}_w) + (\delta^{18}\text{O}_p - \delta^{18}\text{O}_w)^2$  可对该期充填方解石形成温度进行计算。

该期裂缝充填方解石具有高 Sr、高 Mn 特征,反映较晚的改造破裂期;并且氧同位素平均为  $-14\text{‰}$  (PDB),计算出的温度为  $105.05\text{°C}$ ,对应的充填包裹体平均均一温度为  $93.17\text{°C}$ ,二者仅相差  $11.88\text{°C}$ 。如按形成温度  $100\text{°C}$  考虑,地温梯度  $3\text{°C}/\text{km}$ ,当时地面温度  $20\text{°C}$ ,则第二期裂缝形成时埋深应在  $2\ 667\text{ m}$  左右,与燕山期构造运动有对应性。

##### 1.4.3 燕山晚—喜山早期

第三期裂缝充填方解石同位素为  $-16.5\text{‰}$  (PDB),按测温方程得到形成时的温度约  $147.8\text{°C}$ ,包裹体氧测定均一温度平均为  $132.3\text{°C}$ ,二者相差  $15.5\text{°C}$ ,如按  $140\text{°C}$  为形成时温度考虑,则形成时埋深为  $4\ 000\text{ m}$  左右,与燕山晚期及喜山早期构造运动相

对应,这一时期正是地层变形形成鼻状隆起时期。

从同位素分布图(图4)中还可看到四个分区,但总体来看,由于储层埋藏后,经历了多期构造运动,所以,破裂期次多;但从破裂作用的强度来看,应以 I、II、III 同位素区对应的破裂作用为主。

## 2 储层裂缝控制因素

马五<sub>1</sub>储层中裂缝形成与具体的地质环境和岩石性质密切相关,研究这些地质环境将有助于预测和评价马五<sub>1</sub>储层裂缝的分布特征。

### 2.1 风化缝形成的地质因素

风化缝的形成主要与风化岩溶作用形成的地貌条件、岩层产状等因素有关。

#### 2.1.1 表面风化破裂裂缝

与在残丘处相对发育的地貌关系密切。如前所述,表层的机械风化破裂在全区来说是一种普遍的破裂,大多数主要在表面  $15\text{ m}$  范围以内(图6),因而岩溶微地貌中残丘表层风化破裂带相对发育。

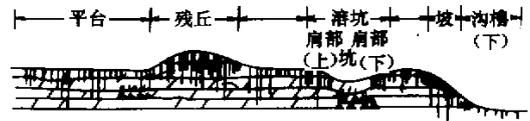


图6 马五<sub>1</sub>储层残余微地貌及风化岩溶破裂带分布示意图

Fig.6 Sketch on distribution of remnant miniature geomorphology and weathered karstification cracking zone of Ma<sub>51</sub> reservoir

#### 2.1.2 岩溶坍塌缝主要

发育于坍塌角砾岩和溶坑的上肩部。岩溶坍塌缝主要与坍塌作用有关,而较大规模的坍塌在岩溶地貌上就形成溶坑,因而坍塌角砾发育区和溶坑区是该类缝的发育区。气田实际资料表明,见角砾的井约 24 口,其中,中—高产井约占  $38.56\%$ ,工业气流井占  $85\%$  以上。

#### 2.1.3 陡壁拉张破裂缝

主要分布于沟槽边缘或溶坑四周。当然陡壁高差越大,重力势越高,该类破裂就越发育(如 G19-11 井与陕 42 井之间陡壁)。

### 2.2 构造缝形成的地质因素

构造缝的形成显然与古应力场条件及岩石本身的力学属性有关。马五<sub>1</sub>储层中按岩石力学观点其构造破裂受控于力学结构面。根据力学实验成果及实际资料的统计结果,对影响构造缝形成的地质因素归结为以下几点。

### 2.2.1 孔隙度

根据岩石力学参数测定结果可以表明:随着样品孔隙度增加,其抗张强度减小,说明高孔隙度样品或溶蚀孔洞发育的样品,在应力环境相同条件下,最先发生张破裂,其孔隙度越高,抗张强度越低(图7)。这一结果表明,马五<sub>1</sub>储层中物性较好的地区相对于物性差的地区在应力环境相近的条件下,破裂作用应更强。

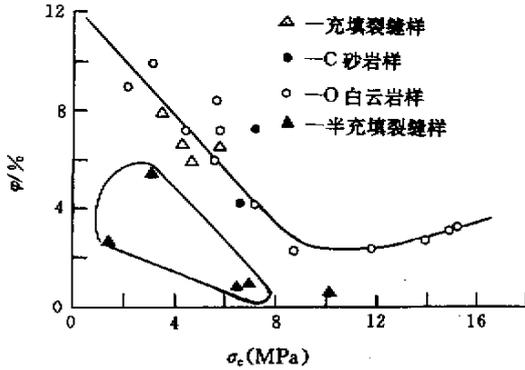


图7 马五<sub>1</sub>储层孔隙度与抗张强度关系图

Fig.7 Relationship between porosity and tensile strength of Ma5<sub>1</sub> reservoir

### 2.2.2 早期破裂面

由于马五<sub>1</sub>储层在风化剥蚀期可以形成各类裂缝,这些裂缝的存在成为力学薄弱面,在构造应力相协调的条件下,晚期构造破裂作用可以沿这些早期破裂面再次发生破裂(如早期裂缝全充填)或在早期破裂面基础上发育。说明早期裂缝对后期的破裂有重要的控制作用。

### 2.2.3 纹理面

对具有水平纹理面的井的部分样品进行了两次点荷载试验,第一次平行于纹理面拉张,测得形成张破裂时的抗张强度为 4.3 MPa,用无纹层的残样同样进行拉张试验,得到张破裂时的抗张强度为 10.4 MPa(图8),明显后者比前者大两倍多。说明了地层中的层理、纹理面在应力与之协调时对破裂有重要影响(与岩芯观察结果相吻合)。

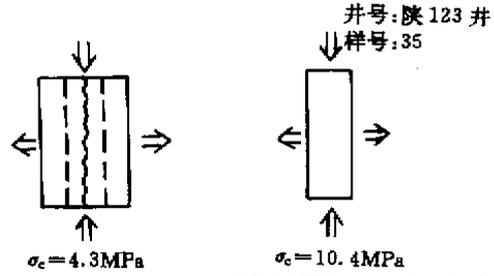


图8 纹层对岩石破裂强度的影响

Fig.8 Influence of grain layer to rock cracking intensity

### 2.2.4 岩性

马五<sub>1</sub>储层中主要的岩石类型为各类云岩(颗粒、角砾、晶粒云岩及云质灰岩、灰质云岩)。云岩和灰岩的力学特征存在较大差异,静力学参数也不同,白云岩的破裂强度低,塑性变形阶段短,而灰岩则破裂强度高,塑性变形阶段长。

### 2.3 裂缝分布规律及地质意义

长庆气田马五<sub>1</sub>储层裂缝的发育对孔隙度演化过程中岩溶水的渗流以及溶蚀孔洞的最终形成起着积极的建设性作用,并且裂缝的发育有规律可寻,构造缝的发育与鼻隆的分布有关;风化缝主要分布于古地貌的高部位以及岩溶斜坡带,在整个气田范围内,由北向南风化缝相对发育,由南向北构造缝相对发育;在马五<sub>1</sub>储层内部:马五<sub>1</sub>段以垂直缝相对发育;马五<sub>2</sub>段主要以垂直、斜交缝为主;马五<sub>3</sub>段以网状缝为主;马五<sub>4</sub>段裂缝类型多且有效缝发育程度较低。马五<sub>1</sub>储层中有有效缝其储集意义小,但对沟通溶孔,提高储层渗流能力有着十分重要的地质意义,同时对地层产能有重要影响,这些有效缝,少部分是风化期破裂被充填残留的,大部分则是重新形成或在原来破裂的基础上发展的破裂裂缝。

综上所述,马五<sub>1</sub>储层中裂缝类型较多,成因复杂,但有效缝主要是构造成因破裂和风化形成的破裂裂缝;马五<sub>1</sub>储层中构造缝组系方向与局部构造有一定联系,并且与储层孔隙度发育、早期破裂面、储层纹理面以及储层岩性有关;风化缝发育与风化岩溶地貌有关。

### 参 考 文 献

- 1 王允诚. 裂缝性致密油气储集层 [M]. 北京:地质出版社,1992
- 2 赵重远,刘池洋. 华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存 [M]. 西安:西北大学出版社,1993

## A Discussion on the Fracture Characteristics and Controlling Factors of the Ma<sub>5</sub><sub>1</sub> Reservoir in Changqing Gas Field

WANG Cai-li SUN Liu-yi WANG Chen WANG Hong-zhang

( Research Institute of Petroleum Exploration and Development of Changqing Oil Field Company , Xi 'an 710021 )

### Abstract

The Ma<sub>5</sub><sub>1</sub> reservoir is the main gas reservoir in changqing gas field. The main fracture types of reservoir are four types : vertical , oblique , horizontal and braided. Although there are lots of fracture types in Ma<sub>5</sub><sub>1</sub> reservoir , the main types that have a great influence on the percolation flow of the reservoir are two types , i. e. , structural fracture and weathered fracture. The formation stages of fracture in Ma<sub>5</sub><sub>1</sub> reservoir are mainly three , i. e. , ( 1 ) Caledonian stage , in which all kinds of weathered fractures have been formed ; ( 2 ) mid-stage of Yanshan movement , which is an important structure-ruptured stage ; ( 3 ) Late Yanshan stage to early Himalayan stage. In this paper , geological factors forming fractures are studied and analyzed , it is summarized as that , the formation of the weathered fractures is mainly related to the occurrence of the rock strata , but the formation of structural fracture is related to the condition of palaeo-stress field and the mechanics property of rock itself.

**Key words** type of fracture , ruptured stage , structural fracture , weathered fracture , Changqing gas field