

引用格式: 赵兰. 致密砂岩储层微裂缝发育特征及对物性的影响——以杭锦旗地区十里加汗区带为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(2): 285-291.

ZHAO Lan. Development characteristics of microfractures in tight sandstone reservoir and its influence on physical properties: A case study of Shiligiahan zone in Hangjinqi[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 285-291.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.02.003

# 致密砂岩储层微裂缝发育特征及对物性的影响

——以杭锦旗地区十里加汗区带为例

赵 兰

(中国石化华北油气分公司勘探开发研究院, 河南 郑州 450006)

**摘要:** 杭锦旗地区十里加汗区带二叠系下石盒子组盒1段砂岩平均孔隙度8.3%, 平均渗透率 $0.89 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 为典型的致密砂岩储层, 而微裂缝对改善致密砂岩储层物性起着重要作用, 因此, 开展微裂缝研究是该区储层研究的重点。通过微观薄片观察, 结合压汞、岩心物性以及构造特征, 对该区微裂缝的类型与成因、形成期次、控制因素以及微裂缝对物性的影响进行研究。结果表明, 研究区盒1段致密砂岩按照接触关系可分为粒内缝、粒缘缝和穿粒缝, 按照充填程度可分为未充填缝、不完全充填缝和完全充填缝。根据成因分析, 研究区至少存在三期微裂缝。其发育程度受内因(砂岩粒度、岩石碎屑成分、岩屑和填隙物含量以及颗粒间的接触关系等)和外因(构造应力)的联合控制。微裂缝主要影响储层的渗透率, 多因素影响是微裂缝性致密储层的一个基本特点, 平均喉道半径对储层渗透率起主要控制作用。

**关键词:** 致密砂岩储层; 微裂缝; 充填程度; 孔喉结构; 渗透率

中图分类号: TE122

文献标识码: A

## Development characteristics of microfractures in tight sandstone reservoir and its influence on physical properties: A case study of Shiligiahan zone in Hangjinqi

ZHAO Lan

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec North China Oil and Gas Company, Zhengzhou, Henan 450006, China)

**Abstract:** The average porosity and permeability of sandstone of Lower Shihezi Formation of Permian system in Shilijiahan area of Hangjinqi area are of 8.3 % and  $0.89 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  respectively, causing the reservoir to be a typical tight sandstone reservoir. Meanwhile, the microfractures play an important role in improving the physical properties of tight sandstone reservoir. Therefore, the researches of the reservoir in this area focus on the microfractures. By the observation of the microscopic thin section, and combined with the mercury injection, core physical properties and structural characteristics, the types and genesis, formation stages, control factors and the influence of micro fractures on physical properties in this area have been studied. The results show that the tight sandstone of Lower Shihezi Formation in the study area can be divided into intragranular fracture, grain edge fracture and grain penetrating fracture according to the contact relationship of strata, and can be divided into unfilled fracture, incomplete filled fracture and complete filled fracture according to the filling degree. According to the genetic analysis, there are at least three stages of micro fractures in the study area. Their development degree are controlled by the combination of internal factors (sandstone particle size, rock debris composition, rock debris and interstitial content, contact relationship between particles, etc.) and external factors (tectonic stress). The microfractures mainly affect the permeability of the reservoir. The multi-factor influence is a basic feature of micro fractured tight reservoir. The average throat radius plays a major role in controlling the permeability of the reservoir.

**Keywords:** tight sandstone reservoir; microfracture; filling degree; pore-throat structure; permeability

收稿日期: 2021-09-14。

作者简介: 赵兰(1987—), 女, 硕士, 工程师, 现主要从事石油天然气地质研究。地址: 河南省郑州市陇海西路199号中国石化华北油气分公司, 邮政编码: 450006。E-mail: zhaolan\_0123@126.com

基金项目: 中国石化科研项目“鄂尔多斯盆地晚古生代盆地原型与油气成藏过程研究”(P21088-2)。

杭锦旗地区十里加汗区带二叠系下石盒子组、山西组主力气层为特低-超低渗透储集层,近年来的勘探开发表明,目的层内存在相对高渗的储集层段,微裂缝是改善储集层物性的重要因素<sup>[1]</sup>,可以作为油气储集空间,也可以沟通各孔隙间的联系,极大提高储层的渗透性<sup>[2]</sup>,因此,对于存在微裂缝的油气藏,特别是致密砂岩油气藏,开展储层微裂缝的认识和研究,明确微裂缝对储层物性的影响,是致密储层综合评价的重要内容。

根据裂缝划分级次并结合不同级别裂缝在油气田勘探开发中的作用,将开度大于 50 μm 的裂缝定义为宏观裂缝<sup>[3]</sup>,系指可以在露头、岩心以及测井曲线上直接观察和描述的裂缝。将开度小于 50 μm 的裂缝定义为微观裂缝<sup>[4]</sup>,该裂缝需借助显微镜、电镜才能进行观察和描述。国内外学者对微裂缝的特征、分布、参数计算、形成机理以及其对储层的影响开展了一些研究工作,但主要集中在页岩、低渗透砂

岩储层,目前对致密砂岩储层中微裂缝的成因及主控因素尚缺少系统研究<sup>[2-5]</sup>。以杭锦旗地区十里加汗区带致密砂岩储层为例,对微裂缝的发育特征、成因类型、控制因素以及其对储层的贡献进行研究,为油气勘探开发提供指导。

### 1 地质背景

杭锦旗地区位于鄂尔多斯盆地北部,横跨伊盟隆起、伊陕斜坡和天环坳陷3个构造单元<sup>[6-7]</sup>。十里加汗区带位于杭锦旗地区中部、泊尔江海子断裂以南,区内三、四级小断层较发育(图1)。研究区主要目的层为上古生界二叠系山西组山2段与下石盒子组盒1段,地层厚度为75~110 m,构造埋藏深度为2 650~3 200 m,沉积环境为辫状河和三角洲平原,发育多套碎屑岩沉积,储层厚度较大,非均质性强。目的层以岩屑石英砂岩为主,其次为岩屑砂岩;砂岩

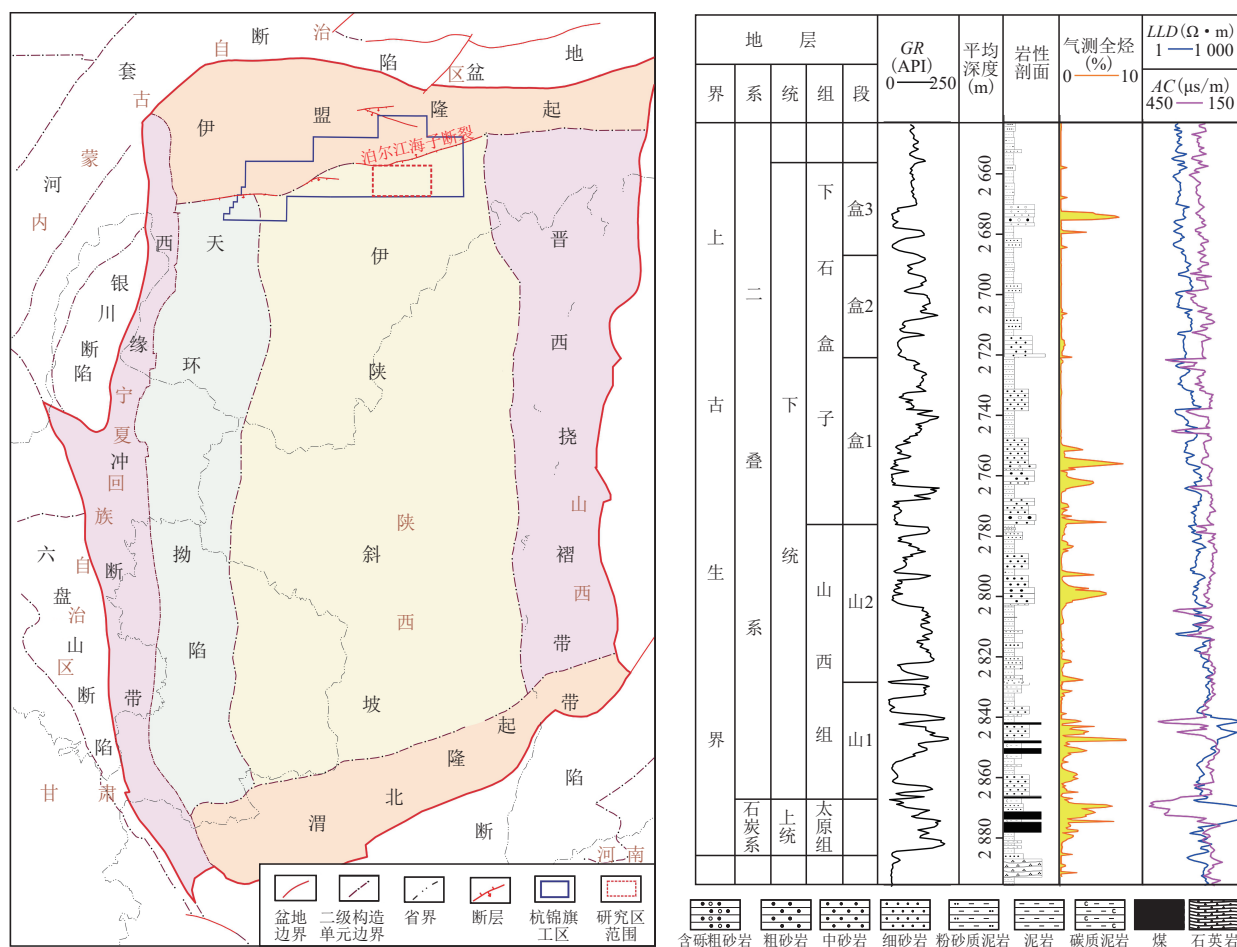


图1 研究区构造位置及地层柱状图  
Fig. 1 Structural location and stratigraphic histogram of study area

成分成熟度、结构成熟度中等,填隙物为泥质杂基、碳酸盐和硅质胶结物,胶结类型以孔隙胶结和接触胶结为主;颗粒支撑,点一线接触为主,少量凹凸接触;储层平均孔隙度为8.3%,平均渗透率则小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属致密砂岩储层;储集空间以粒内溶孔、粒间溶孔为主,可见晶间微孔和微裂缝,偶见少量粒间孔和铸模孔。微裂缝是该区致密砂岩储层有效储集空间的重要组成部分,其发育程度对产能具有重要的控制作用。

## 2 微裂缝的类型及特征

研究区平均每块裂缝薄片中有2~3条微裂缝,反映该区致密砂岩储层微裂缝较为发育。

按照岩心常规薄片、铸体薄片微裂缝与颗粒的接触关系,可将致密砂岩储层的微裂缝分为粒内缝、粒缘缝和穿粒缝。研究区以粒缘缝为主,含粒缘缝的薄片占51.9%,平均开度为12.5  $\mu\text{m}$ ,平均面密度为0.51  $\text{cm}/\text{cm}^2$ 。含穿粒缝的薄片占22.2%,开度主要分布于10~25  $\mu\text{m}$ ,少数可达50  $\mu\text{m}$ ,平均面密度为0.43  $\text{cm}/\text{cm}^2$ 。含粒内缝的薄片占25.9%,平均开度为5.6  $\mu\text{m}$ ,平均面密度为0.25  $\text{cm}/\text{cm}^2$ (表1)。

按照微裂缝的充填程度则可分为未充填缝、不完全充填缝和完全充填缝,其中以未充填缝为主,占比达53.2%,其次为完全充填缝,占比为26.1%,不完全充填缝占比为20.7%,反映该区微裂缝充填程度中等(表2)。

### 2.1 接触关系分类

1) 粒内缝:发育在颗粒内部,常见于石英或长石颗粒中。此类裂缝延伸长度小,终止于颗粒内部或边缘,开度一般小于10  $\mu\text{m}$ 。因规模受限,粒内缝互不连通,即使该裂缝较发育,其对储层的渗透性贡献也小(图2a)。

2) 粒缘缝:沿颗粒边缘发育,相互连通性好。此类裂缝规模中等,延伸中等,其开度一般小于15  $\mu\text{m}$ ,粒缘缝多呈网状分布(图2b)。粒缘缝是研究区最主要的微裂缝类型。

3) 穿粒缝:不受颗粒限制,表现为切穿岩石颗粒和基质。此类裂缝规模相对较大,延伸较长,平均开度为20  $\mu\text{m}$ ,少数达50  $\mu\text{m}$ ,常具断续、分支等分布特征,可与粒缘缝交织呈网状,从而增加储层渗透性(图2c)。

### 2.2 充填程度分类

1) 未充填缝:微裂缝未被矿物充填,可作为储集空间或渗流通道(图2d)。

2) 不完全充填缝:微裂缝没有完全被矿物充填,充填物内仍存在孔隙空间,部分可作为储集空间或渗流通道。该类型的裂缝可以是早期未充填完全,也可以是充填完全后再次裂开的裂缝(图2e)。

3) 完全充填缝:微裂缝形成以后,完全被矿物充填。充填物内无孔隙空间,不可作为储集空间或渗流通道,即无效缝(图2f)。

表1 接触关系分类的微裂缝特征统计

Table 1 Statistics of microfracture characteristics in contact relation classification

裂缝类型	开度( $\mu\text{m}$ )	面密度( $\text{cm}/\text{cm}^2$ )	发育位置	发育特征	占比(%)
粒内缝	5.6	0.25	颗粒内部	延伸长度小,终止于颗粒内部或边缘	25.9
粒缘缝	12.5	0.51	颗粒边缘	规模中等,延伸中等,多呈网状分布	51.9
穿粒缝	10~25,少数50	0.43	切穿岩石颗粒和基质	规模相对较大,延伸较长,可与粒缘缝交织呈网状	22.2

表2 充填程度分类的微裂缝特征统计

Table 2 Statistics of microfracture characteristics classified by filling degree

裂缝类型	发育特征	是否存在孔隙空间	占比(%)
未充填缝	微裂缝未被矿物充填	存在	53.2
不完全充填缝	微裂缝没有完全被矿物充填	部分存在	20.7
完全充填缝	微裂缝形成后,完全被矿物充填	不存在	26.1

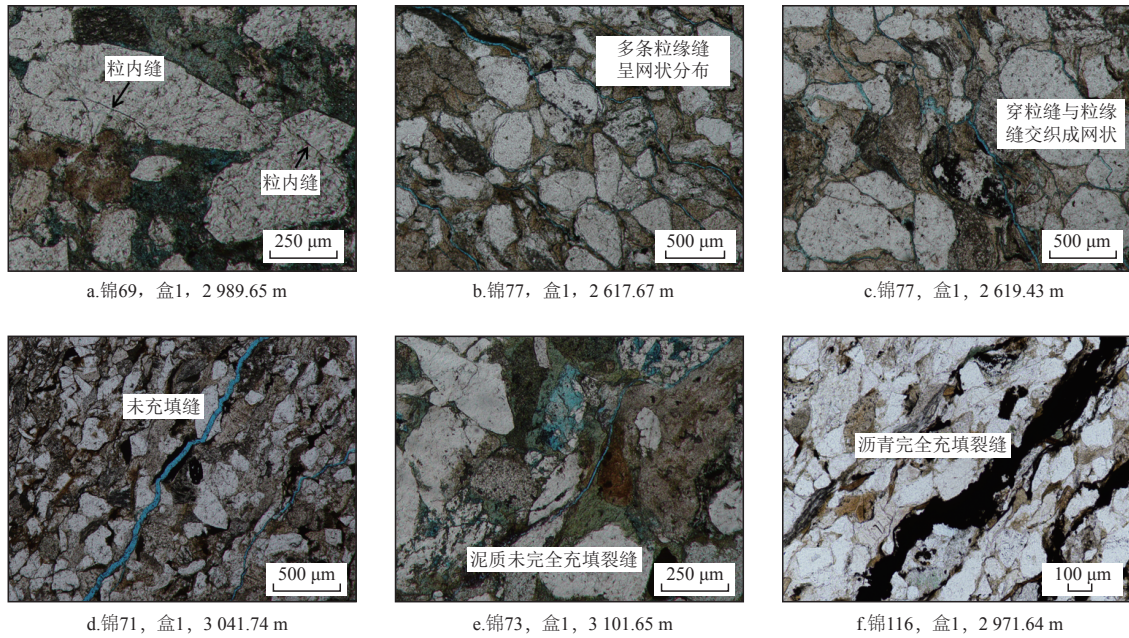


图2 微裂缝类型薄片

Fig. 2 Thin sheet showing microfracture types

### 3 微裂缝成因及期次探讨

#### 3.1 微裂缝成因

微裂缝在成因上可分为原生、成岩和构造成因的微裂缝。

原生微裂缝是指储层沉积以前的母岩中已形成的裂缝,它们绝大部分已经被矿物全充填,属于无效裂缝<sup>[8-10]</sup>。研究区原生成因的粒内缝大多被泥质完全充填(图2a)。

成岩微裂缝是在成岩过程中形成,由沉积物压实失水,颗粒之间相互挤压而形成。成岩成因的粒内缝以裂缝与颗粒间的接触面垂直为特征,多为不规则形状,一般颗粒间以线—凹凸接触方式易形成此类裂缝(图3a)。机械压实作用形成的粒缘缝、穿粒缝则相对较少。

构造微裂缝是受构造应力控制的裂缝,方向性明显<sup>[11]</sup>。研究区以构造成因的微裂缝占主导,铸体薄片上可观察到大量构造成因的粒内缝与构造成因的粒缘缝、穿粒缝近平行,或是构造成因的粒缘缝、穿粒缝相互伴生(图3b)。

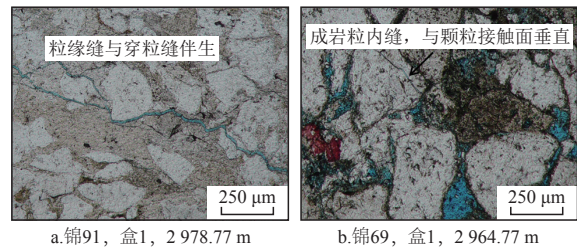


图3 微裂缝成因薄片

Fig. 3 Thin sheet showing origin of microfractures

#### 3.2 微裂缝期次

微裂缝的充填序列和切割关系可为裂缝的形成期次和形成时间提供地质依据<sup>[12-14]</sup>。通过观察薄片微裂缝的充填及切割现象,发现既有原生裂缝充填(图4a),又有成岩裂缝充填以及成岩后溶蚀形成的裂缝(图4b),以及前期充填的裂缝二次裂开形成的构造缝(图4c),同时,观察到一组构造缝切割另一组构造缝(图4d)。

综合研究区区域构造演化及岩心薄片分析:原生裂缝是由早期差异性压实作用形成,当成岩演化到一定阶段,由油气充注时产生的酸性流体物质改

造形成溶蚀缝,到了晚期,研究区主要经历两期较强的构造运动,分别是燕山期的强烈挤压和喜山期的张扭反转作用,致使前期充填的裂缝二次裂开或是晚期形成的裂缝切割早期裂缝。

基于上述特征,总结出研究区至少存在三期微裂缝:第一期为早期泥质或碳质充填在原生裂缝中;第二期为沥青、黏土充填在成岩裂缝中或部分微裂缝进一步溶蚀形成溶蚀缝;第三期为晚期沥青充填的成岩裂缝再次裂开或成岩过程中被方解石交代的矿物裂开形成的构造裂缝。

## 4 微裂缝发育控制因素

根据区域地质背景,研究区内断层较为发育。在构造应力作用下,区内宏观、微观裂缝广泛发育,在不同地层不同沉积相带中均可见微裂缝,其形成与构造作用有关。同时,微裂缝的发育还与碎屑岩的成分和结构有关。不同砂岩粒度、岩石碎屑成分、岩屑和填隙物含量以及颗粒间的接触关系控制着微裂缝的发育程度。总体上,研究区微裂缝的发育可归为内在和外在两类控制因素。

### 4.1 内在控制因素

砂岩粒度:较粗的颗粒相互间接触面积小,单位面积上所受上覆岩层压力和侧向压力较大<sup>[15-16]</sup>,利于微裂缝发育,反之,粒度小的砂岩,微裂缝则不发育。颗粒大小的均匀程度同样控制着微裂缝的发育程

度:分选好的砂岩颗粒间接触面积小,利于微裂缝发育,反之,则不发育。对研究区铸体薄片进行微裂缝统计,微裂缝主要发育在含砾粗砂岩、中一粗砂岩中,粒径主要分布区间为0.50~0.83 mm,且粒度越粗、分选越好,微裂缝越发育(图5)。

岩石碎屑成分:研究区裂缝薄片或部分岩石碎屑含灰质、钙质等脆性成分,在相同应力条件下,相对脆性的颗粒相互挤压,所受应力较为集中,易破裂而形成微裂缝。

岩屑和填隙物含量:当硬度较高的石英、长石和含量较高的软性岩屑、填隙物在上覆压力和侧向压力作用下,由于横向和纵向上软、硬物质的压实速率不同,易在软硬物质的接触处,即石英和长石颗粒周边发生相对位移和错动,形成粒缘缝<sup>[17]</sup>,研究区目的层砂岩以岩屑石英砂岩为主,其次为岩屑砂岩,可见岩屑含量相对较高,粒缘缝为该区主要微裂缝类型(表1)。而当砂岩中填隙物含量较低时,在受到外力作用时,因石英、长石颗粒及岩屑周边缺少塑性组分的抗压,则易在颗粒或岩屑中形成粒内缝和穿粒缝。

颗粒间的接触关系:研究区颗粒间以点一线接触为主,偶见凹凸接触。点一线接触有利于粒内缝、粒缘缝发育(图2b),线一凹凸接触则有利于穿粒缝发育,而其他接触方式未见微裂缝发育。

### 4.2 外在控制因素

研究区二叠系山西组山2段与下石盒子组盒1段的微裂缝的发育具有普遍性。受区域构造作用的控制,盆地在经历海西期及印支期的稳定沉积后,燕山期地层受强烈的挤压和隆升,形成一系列逆冲断层、节理构造,由于岩石内在因素的控制,抗压性的不同,导致地层中发育不同特征微裂缝<sup>[18]</sup>,如方向性

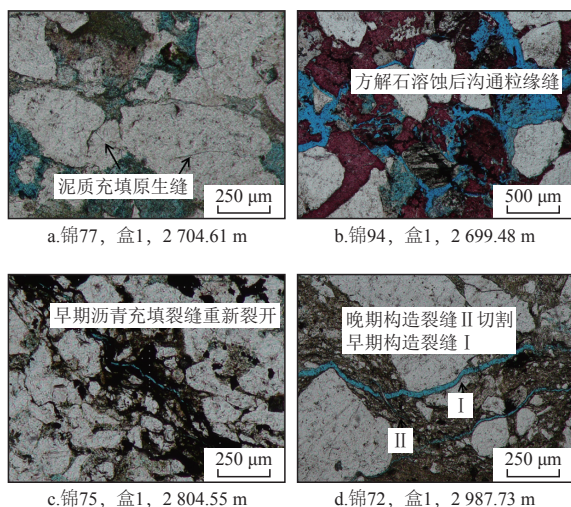


图4 微裂缝形成期次薄片

Fig. 4 Thin sheet showing microfracture formation stage

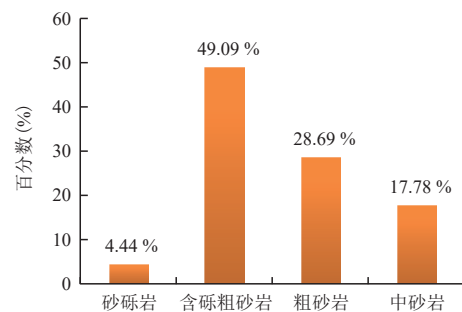


图5 不同砂岩粒度微裂缝发育直方图

Fig. 5 Histogram of microfracture development in sandstone with different grain sizes

明显的构造微裂缝(图2d)、网状交织的构造微裂缝(图2b)等。后期受喜山运动的拉张作用,发生构造反转,发育张扭性断层,并导致裂缝的二次裂开(图4c)或切割现象(图4d),多期构造应力的复合作用结果形成了当前的微裂缝展布格局。

## 5 微裂缝对储层的控制作用

### 5.1 储层物性

根据研究区20口井1571块岩心物性资料分析,同等渗透率的岩心样品,含微裂缝的孔隙度明显低于不含微裂缝的孔隙度,而同等孔隙度的岩心样品,渗透率高的微裂缝发育程度明显高于渗透率低的样品。砂岩孔隙度主要介于4.3%~23.9%,平均孔隙度8.3%,渗透率主要介于 $(0.01 \sim 2.61) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均渗透率 $0.89 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,为典型的致密砂岩储层。其中,不含微裂缝的岩心样品平均孔隙度7.0%,平均渗透率 $0.31 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔渗正相关性较好(图6a);含微裂缝的岩心样品平均孔隙度11.0%,平均渗透率 $3.23 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔渗几乎无相关性(图6b)。以上统计结果说明,微裂缝主要影响储层渗透率,对储层孔隙度影响较渗透率小,主要起沟通孔隙的作用。

研究区致密砂岩储层未充填的微裂缝可以沟通各孔隙间的联系,极大提高储层的渗透性。裂缝形成以后,在后期成岩过程中往往被黏土、沥青充填,不完全充填缝的裂缝体积变小,有效性变差,而完全充填缝则无可测孔隙空间,对储层渗透率不起作用。另外,沥青完全充填的微裂缝因构造作用再次裂开以及部分微裂缝进一步溶蚀,这些微裂缝使储层孔隙得以沟通,渗透性增强<sup>[19]</sup>。研究区未充填缝与不完全充填缝共占73.9%,反映该区多数裂缝

有效性好,对储层渗透率贡献作用较大。

### 5.2 孔喉结构

通过分析研究区13口井71块压汞样品的平均喉道半径与渗透率的相关性关系,对比微裂缝发育的岩心样品和微裂缝不发育的岩心样品的渗透率差别,进而分析微裂缝对储层物性的影响。

图7可看出,对样品的平均喉道半径和渗透率值均取对数后,两者符合线性关系。微裂缝不发育的样品相关系数达0.945,说明在致密砂岩储层中,平均喉道半径对渗透率起主要控制作用<sup>[20-21]</sup>,且平均喉道半径越大,渗透率越高;反之,渗透率越小。微裂缝发育的样品直线斜率大于微裂缝不发育的样品,这说明微裂缝发育的样品与不含微裂缝的样品喉道半径相当时,前者渗透率更高。同时,微裂缝发育的样品相关系数为0.724,低于微裂缝不发育的样品,主要是渗透率低值区,样品较分散。表明随着微裂缝的发育程度降低,其对渗透率的贡献也随之变弱,导致渗透率值降低,而其他因素如微观均质系数、相对分选系数等因素对渗透率的影响则越大,受多因素影响,故渗透率低值区样品变得分散。

## 6 结论

1) 研究区盒1段致密砂岩按照接触关系可分为粒内缝、粒缘缝和穿粒缝,按照充填程度可分为未充填缝、不完全充填缝和完全充填缝;根据成因分析,研究区至少存在三期微裂缝,分别为早期原生缝,成岩后溶蚀缝以及晚期形成的构造缝。

2) 微观裂缝的发育程度主要受内因(砂岩粒度、岩石碎屑成分、岩屑和填隙物含量以及颗粒间的

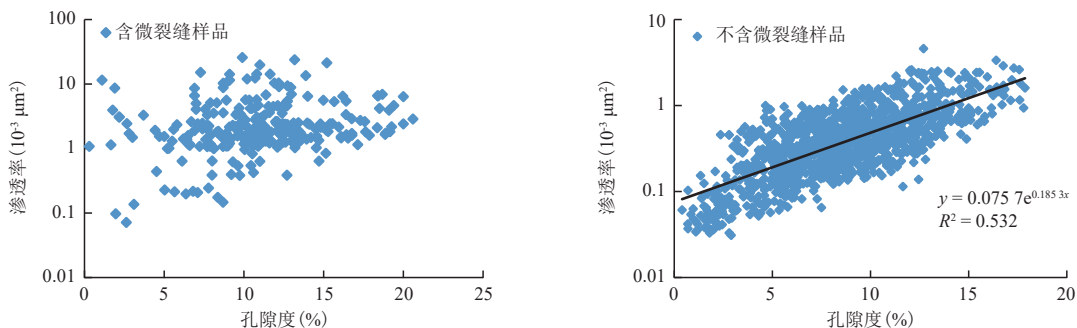


图6 渗透率与孔隙度关系

Fig. 6 Relation between permeability and porosity

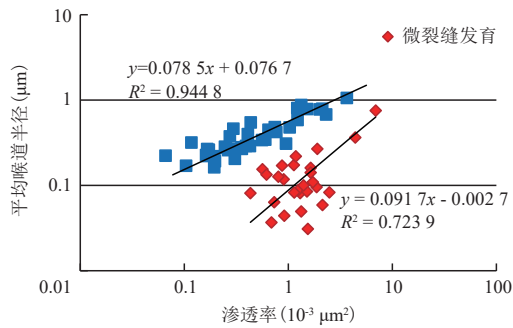


图7 渗透率与平均喉道半径关系  
Fig. 7 Relation between permeability and average throat radius

接触关系等)和外因(构造应力)的联合控制。粒度较粗、分选较好、碎屑含脆性成分、点一线与凹凸接触以及较强的构造应力作用有利于微裂缝发育。

3) 微裂缝对储层物性的影响主要体现在对渗透率具有重要贡献,对储层孔隙度影响较小,主要起沟通孔隙的作用。平均喉道半径对储层渗透率起主要控制作用,且平均喉道半径越大,渗透率越高;反之,渗透率越小。

参考文献

[1] 王景,凌升阶,南中虎.特低渗透砂岩微裂缝分布研究方法探索[J].石油勘探与开发,2003,30(2):51-53.  
WANG Jing, LING Shengjie, NAN Zhonghu. Micro-fractures distribution in extremely lower permeable sandstone reservoirs of Yanchang Formation and its geologic significance, Ordos Basin, Northwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 51-53.

[2] 吕文雅,曾联波,周思宾,等.鄂尔多斯盆地西南部致密砂岩储层微观裂缝特征及控制因素——以红河油田长8储层为例[J].天然气地球科学,2020,31(1):37-46.  
LYU Wenya, ZENG Lianbo, ZHOU Sibin, et al. Microfracture characteristics and its controlling factors in the tight oil sandstones in the southwest Ordos Basin: Case study of the eighth member of the Yanchang Formation in Honghe Oilfield [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(1): 37-46.

[3] 曾联波,李跃纲,王正国,等.邛西构造须二段特低渗透砂岩储层微观裂缝的分布特征[J].天然气工业,2007,27(6):45-47.  
ZENG Lianbo, LI Yuegang, WANG Zhengguo, et al. Distribution of microfractures in ultralow permeability sandstone reservoirs of the second member of Xujiahe formation ( $t^3x_2$ ) in Qiongsi structure[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(6): 45-47.

[4] ANDERS M H, LAUBACH S E, SCHOLZ C H. Microfractures: A review[J]. Journal of Structural Geology, 2014, 69(9): 377-394.

[5] PALCIAUSKAS V V, DOMENICO P A. Microfracture

development in compacting sediments: relation to hydrocarbon-maturation kinetics[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(6): 927-937.

[6] 邓东.鄂北杭锦旗地区锦72井区盒1段储层特征及综合评价研究[D].西安:西北大学,2019.  
DENG Dong. Reservoir characteristics and comprehensive evaluation of He1 Member of J72 well area in Hangjinqi, Northern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2019

[7] 王飞龙.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界古水动力体系与油气运移成藏[D].西安:西北大学,2007.  
WANG Feilong. Study on the palaeohydrodynamic system and hydrocarbon migration and accumulation of Upper Paleozoic in the region of Hangjinqi in Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2007.

[8] 巩磊,曾联波,陈树民,等.致密砾岩储层微观裂缝特征及对储层的贡献[J].大地构造与成矿学,2016,40(1):38-46.  
GONG Lei, ZENG Lianbo, CHEN Shumin, et al. Characteristics of micro-fractures and contribution to the compact conglomerate reservoirs[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(1): 38-46.

[9] 巩磊,曾联波,裴森奇,等.九龙山构造须二段致密砂岩储层裂缝特征及成因[J].地质科学,2013,48(1):217-226.  
GONG Lei, ZENG Lianbo, PEI Senqi, et al. Characteristics and origin of fractures in tight sandstone reservoirs of the second member of Xujiahe Formation in Jiulongshan structure[J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(1): 217-226.

[10] 曾联波,巩磊,祖克威,等.柴达木盆地西部古近系储层裂缝有效性的影响因素[J].地质学报,2012,86(11):1809-1814.  
ZENG Lianbo, GONG Lei, ZU Kewei, et al. Influence factors on fracture validity of the Paleogene reservoir, western Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11): 1809-1814.

[11] 曾联波,李跃纲,王正国,等.川西南部须二段低渗透砂岩储层裂缝类型及其形成序列[J].中国地质大学学报,2007,32(2):194-200.  
ZENG Lianbo, LI Yuegang, WANG Zhengguo, et al. Type and Sequence of Fractures in the Second Member of Xujiahe Formation at the South of Western Sichuan Depression[J]. Journal of China University of Geosciences, 2007, 32(2): 194-200.

[12] 夏宇,邓虎成,王园园,等.川西坳陷彭州地区雷口坡组天然裂缝发育特征与形成期次[J].海相油气地质,2021,26(1):81-89.  
XIA Yu, DENG Hucheng, WANG Yuanyuan, et al. Development characteristics and formation stages of natural fractures of the Triassic Leikoupo Formation in Pengzhou area of Western Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(1): 81-89.

[13] 时光耀,李理,于少群,等.纯41断块沙四段低渗储层裂缝发育特征及期次划分[J].地质科学,2021,56(3):854-866.  
SHI Guangyao, LI Li, YU Shaoqun, et al. Development characteristics and stages of fractures in the low-permeability reservoir of the Fourth Member of Shahejie Formation of Chun-41 fault block[J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(3): 854-866.

(下转第312页)