超深致密砂岩储层裂缝壁面出砂机理及其对应力敏感性的影响

张杜杰[1],康毅力[1],游利军[1],周振寰[1],朱金智[2],李家学[2]
(1.西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500;
2.中国石油塔里木油田分公司,新疆 库尔勒 841000)

摘要:致密储层渗透率的应力敏感性问题一直是致密油气藏开发的研究热点。选用塔里木盆地超深致密砂岩气藏井下岩心样品制取裂缝岩心样品6块,开展超深致密砂岩储层应力敏感性评价实验。实验前、后对裂缝壁面进行激光扫描成像处理,并采用扫描电镜表征其微观结构。实验结果表明,超深致密砂岩储层裂缝岩心样品的应力敏感系数为0.41~0.72,应力敏感程度为中等偏弱—强,明显弱于中国典型致密砂岩储层。三维激光扫描图像对比结果显示,实验前、后裂缝壁面出现明显的砂粒脱落现象;扫描电镜图像显示,实验前裂缝壁面存在大量松散脆弱结构。在超深致密砂岩储层裂缝岩心样品应力敏感性评价实验过程中,裂缝壁面脆弱结构在高速流体拖曳力作用下与壁面脱离,运移过程中持续撞击侵蚀壁面,进一步促进砂粒脱落,形成的砂粒沉积于裂缝狭窄处。当有效应力增加时,具有一定强度的砂粒将起到支撑裂缝的作用,进而起到弱化应力敏感性的效果。裂缝壁面出砂对不同宽度裂缝应力敏感性的弱化程度存在显著差异,其弱化程度从大到小依次为中等宽度裂缝、较大宽度裂缝和较小宽度裂缝。

关键词:超深 裂缝 致密砂岩 应力敏感 出砂 拖曳力 颗粒剥蚀
中图分类号:TE348 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-9603(2017)06-0072-07

Mechanisms of sand production from fracture wall and its effect on stress sensitivity in ultra-deep tight sandstone reservoirs

Zhang Dujie[1], Kang Yili[1], You Lijun[1], Zhou Zhenhuan[1], Zhu Jinzhi[2], Li Jiaxue[2]
(1.*State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation*, *Southwest Petroleum University*, *Chengdu City*, *Sichuan Province*, 610500, *China*; 2.*PetroChina Tarim Oilfield Company*, *Korla*, *Xinjiang*, 841000, *China*)

Abstract: The stress sensitivity of permeability is always an important research topic in the area of tight oil and gas reservoir development. Six fractured samples were prepared from the downhole core samples in the ultra-deep tight sandstone gas reservoir, which were used to conduct the stress sensitivity evaluation experiment in the ultra-deep tight sandstone reservoir. Before and after the experiments of stress sensitivity, laser scan imaging was made on fracture wall. SEM was used to observe the micro-structure of the fracture wall. The research results show that the stress sensitive coefficients of the fractured samples of the ultra-deep tight sandstone reservoir range from 0.41 to 0.72, and the degree of stress sensitivity is from medium and weak to strong, which is significantly lower than that of the typical tight sandstone reservoir in China. The results of three-dimensional laser scanning imaging present that sand particles drop off from the fracture wall before and after stress sensitivity experiments. SEM image shows that the structure of most of the fracture wall is loose and weak before the experiment. During the stress sensitivity evaluation experiments of the fractured samples in the ultra-deep tight sandstone reservoir, the sand particles are separated from the walls of fractures under the effect of erosion, which is caused by drag force and particle erosion. Under the effect of drag force, the particles move and deposit in narrow place of the fractures.

收稿日期:2017-07-11。
作者简介:张杜杰(1989—),男,山东东营人,在读博士研究生,从事储层保护理论与技术方向的研究。联系电话:13547889975,E-mail:zhangdjwork@163.com。
基金项目:非常规油气层保护四川省青年科技创新研究团队项目"水力压裂页岩气井热处理解除损害及强化产能研究"(2016TD0016)。

Due to a certain strength of particles, the deposited sand particles play a role on propped fractures with the increase of effective stress, which can weaken the stress sensitivity to some extent. The degree of influence of sand production from fracture wall on decreasing stress sensitivity are different for fractures with different widths. The degree of weakening effect for fractures with medium width, relatively large width and relatively small width falls in turn.

Key words: ultra-deep; fractures; tight sandstone; stress sensitivity; sand production; drag force; particle erosion

随着中国深井、超深井钻井技术的不断发展，超深致密砂岩气藏以其巨大的资源潜力已成为天然气开发的重要阵地之一[1-3]。以塔里木盆地克深气田为例，该气田埋深达6 000～8 000 m，2015年产气量已达60×10^8 m^3，是中国西气东输气源的重要接替区[4]。超深致密砂岩储层普遍具有粘土矿物丰富、基块致密、天然裂缝发育等特点，孔隙是主要的储集空间，裂缝是重要的渗流通道，生产过程中裂缝的渗透率变化特征直接影响着致密气藏的单井产气量[5-6]。由于裂缝受压变形潜力较大，气藏生产过程中储层孔隙压力的降低将加速裂缝的闭合，使裂缝渗透率大幅降低，表现出较强的应力敏感性。致密砂岩储层裂缝应力敏感性分析对气井产能预测及储层保护等方面的研究具有重大意义，中外学者已进行了大量有针对性的工作[7-14]。超深超高压裂缝性致密砂岩气井的出砂现象已引起人们的关注[15]。广义的出砂砂粒不仅包括粒径为0.1～1 mm的岩石骨架颗粒，也包括粒径在数微米级别的地层微粒和开采过程中地层压力衰竭导致裂缝壁面滑移、破坏产生的破碎岩石骨架颗粒，裂缝壁面的砂粒极有可能影响储层的应力敏感性。超深致密砂岩气藏目前尚处于开发初期，对该类储层的应力敏感性研究相对较少。因此，笔者以开展不同围压条件下的裂缝岩心样品渗透率测试实验为基础，系统开展超深致密砂岩储层应力敏感性评价实验。在实验前、后对裂缝壁面进行三维激光扫描及扫描电镜观察，分析裂缝壁面的微观结构变化，进而综合分析实验结果，明确造成超深致密砂岩气藏裂缝应力敏感性差异的原因，探讨裂缝壁面出砂的形成机理，并简要阐述裂缝壁面出砂对储层裂缝应力敏感性的影响。

1　实验样品及方法

1.1　实验样品

实验样品取自塔里木盆地某超深致密砂岩气藏。其储层埋深为7 000～8 000 m，岩石类型主要为岩屑长石砂岩，粒度以中、细粒为主，其次为粉粒，夹少量不等粒。岩矿成分分析中的石英含量为43%～50%，平均为45.83%；长石含量为33%～38%，平均为35.5%；岩屑含量为18%～22%，平均为19.4%，以变质岩岩屑和岩浆岩岩屑为主，少量沉积岩岩屑。砂岩碎屑颗粒分选中等—好，磨圆度为棱角—次棱角，胶结类型为孔隙—加大孔隙型，颗粒以点—线接触为主，岩石骨架颗粒的粒径为0.125～0.5 mm，碎屑的粒径为0.03～0.5 mm。全岩及粘土矿物分析结果显示，研究区储层的石英含量较高，平均可达54.93%，粘土矿物的平均含量为2.97%，主要以伊利石及伊/蒙间层矿物为主，含少量绿泥石，不含高岭石。该气藏储层基块致密，天然裂缝发育。测井数据显示，其储层孔隙度为2%～6%，渗透率为0.01～1 mD，裂缝线密度为0.7～1.47条/m，平均约为1条/m。室内实验测试结果显示，储层基块气测孔隙度为2%～4%，平均为3.4%；渗透率为0.01～0.035 mD，平均为0.027 mD。选取6块裂缝岩心样品开展应力敏感性评价实验，样品的基础物性参数如表1所示。

表1　裂缝岩心样品基础物性参数

Table1　Basic physical property parameters of fractured samples

样品编号	长度/mm	直径/mm	初始渗透率/mD	初始裂缝宽度/μm
LF-1	44.54	24.68	53.68	10.77
LF-2	46.80	24.72	28.88	8.76
LF-3	46.33	24.67	117.99	14.00
LF-4	51.74	24.80	79.00	12.24
LF-5	49.58	24.70	41.94	9.91
LF-6	50.10	24.80	22.19	8.02

1.2　实验方法

1.2.1　裂缝岩心样品应力敏感性评价实验

选取致密砂岩气藏岩心样品6块，采用巴西劈裂法人工造缝后开展应力敏感性评价实验。其中应力敏感性评价实验进行6组，并选取其中2组进行裂缝壁面激光扫描。具体实验步骤如下：①对岩心样品进行人工造缝。②对裂缝岩心样品进行三维激光扫描（不进行三维激光扫描的岩心样品直接进行第③步）。③使用SCMS-Ⅱ型高温高压岩心多参数测量系统，测定有效应力分别为3，5，10，15，20，30，40，50和55 MPa条件下裂缝岩心样品的渗透

率。④实验完成后对裂缝岩心样品的裂缝壁面重新进行三维激光扫描。

为了更好地评价裂缝岩心样品的渗透率应力敏感性，采用应力敏感系数法[16]进行评价。其应力评价指标为：当应力敏感系数小于等于0.05，裂缝岩心样品无应力敏感性；应力敏感系数小于等于0.3且大于0.05，为弱应力敏感性；应力敏感系数小于等于0.5且大于0.3，为中等偏弱应力敏感性；应力敏感系数小于等于0.7且大于0.5，为中等偏强应力敏感性；应力敏感系数小于等于1.0且大于0.7，为强应力敏感性；应力敏感系数大于1.0，为极强应力敏感性。

1.2.2 裂缝壁面微观表征方法

三维激光裂缝壁面扫描 三维激光裂缝壁面扫描可以对裂缝表面形态进行测量[17]，经过数字化处理后所得的三维图像可直观地展示裂缝壁面的形态变化，对研究应力敏感性评价实验前、后裂缝壁面的出砂情况具有重要意义。实验采用油气藏地质及开发工程国家重点实验室三维激光扫描仪，对应力敏感性评价实验前、后裂缝岩心样品的裂缝壁面进行三维激光扫描，扫描精度为0.05～0.1 mm。

扫描电镜 扫描电镜放大倍数较大，观察精度较高，可以准确地识别和描述裂缝壁面微粒的大小、形态和微观结构，与三维激光扫描技术具有良好的互补性。实验采用Quanta450型环境扫描电镜，放大倍数为6～100 000倍，分辨率约为3 nm。

2 实验结果分析

2.1 裂缝岩心样品应力敏感性评价

通过对6块裂缝岩心样品进行应力敏感性评价实验，结果表明（表2），6块裂缝岩心样品的应力敏感系数分别为0.47，0.65，0.66，0.41，0.49和0.72，应力敏感程度为中等偏弱—强。由裂缝岩心样品应力敏感性评价实验的渗透率变化曲线（图1）可知，裂缝岩心样品的渗透率在有效应力小于等于20 MPa时迅速降低，平均降幅为初始渗透率的10%～20%。

表2 不同有效应力条件裂缝岩心样品渗透率

Table2 Permeability of fractured samples under the condition of different effective stress mD

样品编号	有效应力/MPa							
	3	5	10	20	30	40	50	55
LF-1	53.68	45.47	31.82	10.84	7.89	5.50	4.01	2.90
LF-2	28.88	24.23	6.52	1.89	1.25	0.68	0.40	0.29
LF-3	117.99	39.68	25.44	11.14	5.08	1.83	1.06	0.86
LF-4	79.00	58.00	26.20	12.20	7.36	5.03	3.58	3.05
LF-5	41.94	31.15	13.11	4.17	1.97	1.09	0.64	0.50
LF-6	22.19	14.30	3.88	1.02	0.43	0.21	0.11	0.09

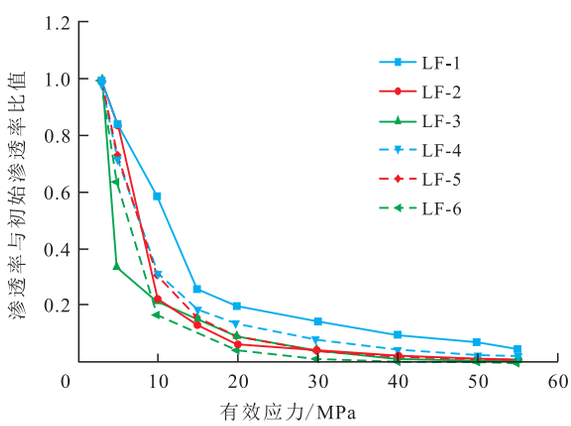


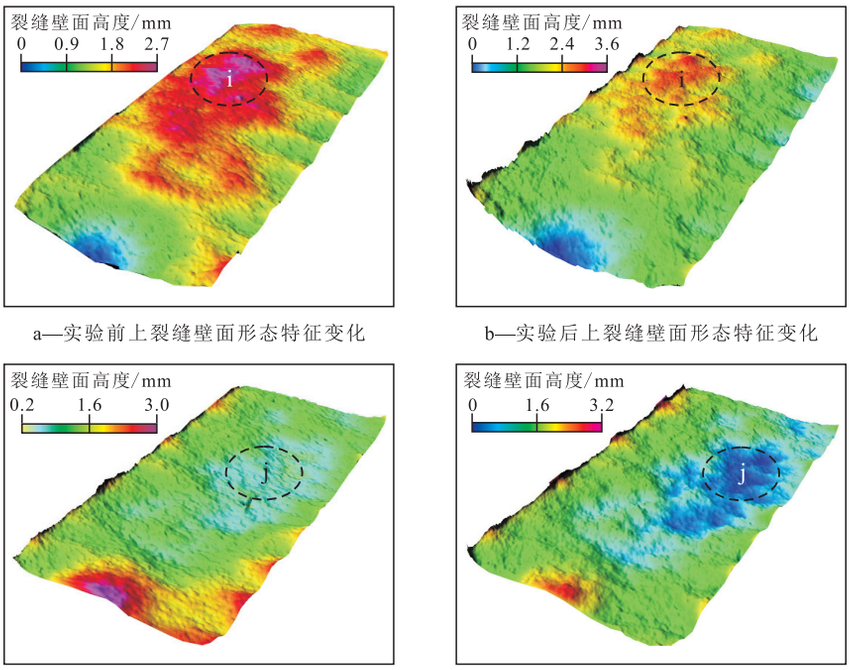
图1 裂缝岩心样品应力敏感性评价实验的渗透率变化曲线

Fig.1 Permeability change curve obtained from stress sensitivity evaluation experiments of fractured samples

与中国典型致密砂岩储层裂缝岩心样品的应力敏感系数[10-12]对比发现，四川盆地和鄂尔多斯盆地等典型致密砂岩储层裂缝岩心样品的应力敏感系数普遍为0.8～1.0，应力敏感程度为强—极强。笔者同样采用致密砂岩裂缝岩心样品，但其应力敏感程度明显偏弱。

2.2 裂缝壁面微观特征

为了研究塔里木盆地超深致密砂岩储层裂缝岩心样品应力敏感性差异的影响因素，从其裂缝壁面微观特征入手，分析造成应力敏感性差异的原因。对应力敏感性评价实验前、后的裂缝壁面进行三维激光扫描，数字化成像后选取典型裂缝岩心样品进行分析。对比2组裂缝岩心样品实验前、后裂缝壁面的形态变化（图2）可知，实验后裂缝壁面原来突出的部分高度有所降低（图2a，2b中i区域），裂缝壁面原来凹陷的部分更向下凹陷（图2c，2d中j区域）。2组裂缝壁面扫描结果显示，虽然实验前已将裂缝壁面易脱落的微粒进行清除，但图像中仍可观



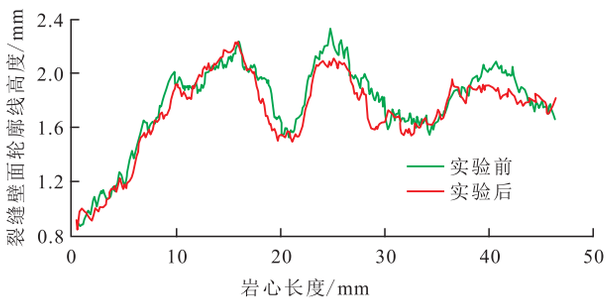
a—实验前上裂缝壁面形态特征变化　　b—实验后上裂缝壁面形态特征变化

c—实验前下裂缝壁面形态特征变化　　d—实验后下裂缝壁面形态特征变化

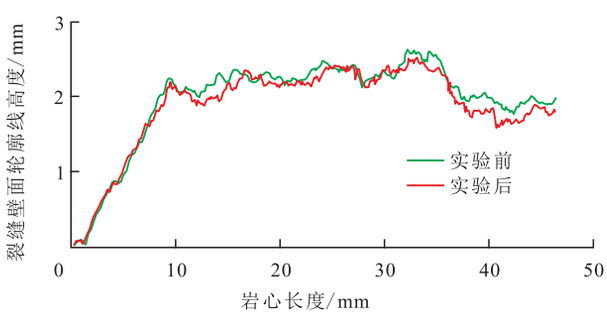
图2　应力敏感性评价实验前、后裂缝岩心样品裂缝壁面三维激光扫描图像

Fig.2　Three-dimensional laser-scanning image of fractured samples before and after stress sensitivity evaluation experiments

测到裂缝壁面凸出部位高度下降，下凹部位高度也下降。分别选取2组裂缝岩心样品裂缝壁面的截面绘制实验前、后裂缝壁面的轮廓线(图3)，对比发现应力敏感性评价实验后裂缝壁面的轮廓线明显降低，分析认为应力敏感性评价实验造成裂缝壁面发生明显的砂粒脱落。



a—上裂缝壁面



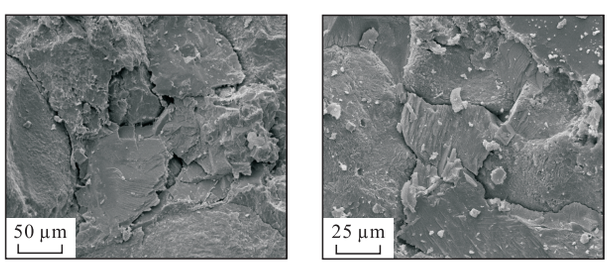
b—下裂缝壁面

图3　应力敏感性评价实验前、后裂缝岩心样品裂缝壁面轮廓线高度对比

Fig.3　Comparison of contour line height of the fracture wall of the fractured samples before and after stress sensitivity evaluation experiments

2.3　裂缝壁面脆弱结构特征

综合分析裂缝壁面微观表征图像(图4)认为，裂缝壁面出现明显的出砂现象，但致密砂岩储层基块胶结致密，流体流动过程中胶结良好的颗粒难以脱离裂缝壁面，由此认为致密砂岩储层裂缝壁面出砂的先决条件是其壁面必须存在脆弱结构。由于选用的致密砂岩岩心样品的石英等矿物含量较高，岩心样品采用巴西劈裂法造缝后，在裂缝壁面产生大量脱落的砂粒。虽然应力敏感性评价实验前已将部分脱落的砂粒清除，但仍可能大量存在与裂缝壁面胶结程度低、易与壁面脱离的脆弱结构。通过扫描电镜对实验前岩心样品的裂缝壁面进行观察，发现裂缝壁面真实分布有大量松散、半胶结甚至未



a—裂缝壁面岩石骨架颗粒　　b—裂缝壁面地层微粒

图4　超深致密砂岩储层裂缝壁面扫描电镜图像

Fig.4　SEM images of the fracture wall of ultra-deep tight sandstone reservoirs

胶结的脆弱结构，其直径多为10～50 μm，抗气流侵蚀能力差。当裂缝内气流达到一定速度时，砂粒在流体的拖曳力作用下极易与裂缝壁面发生脱离，并随流体在裂缝内运移。

3 裂缝壁面出砂机理及其对应力敏感性的影响

3.1 裂缝壁面出砂机理

裂缝壁面微观表征结果显示，储层基块造缝后形成的裂缝壁面存在大量的脆弱结构。脆弱结构须与裂缝壁面脱离并产生运移，才能通过位置的变化改变渗流通道，从而对裂缝岩心样品的应力敏感性产生影响。因此，研究裂缝壁面出砂对应力敏感性的影响首先需明确裂缝壁面脆弱结构的出砂机理。综合分析疏松砂岩出砂机理及土壤风蚀作用机理，认为流体拖曳力和颗粒间撞击剥蚀壁面是裂缝壁面出砂的主要机理。

3.1.1 流体拖曳力诱发裂缝壁面出砂

流体对裂缝壁面砂粒的拖曳力是常规储层出砂的重要机理。在油气井生产过程中，随着流体的高速采出，井筒周围压力梯度及流体的摩擦携带作用使未完全胶结颗粒所受到的拉伸应力即为拖曳力。超深致密砂岩气井的产量较高，储层裂缝内气体流速较大；当气体流速超过门限流速[18]，即岩石表面松散的砂粒所受的拖曳力超过其附着力时，砂粒将在气体拖曳力作用下发生拉张破坏，导致裂缝壁面砂粒脱离，形成壁面出砂。

流体拖曳力的大小与流体的性质和流速、颗粒粒径尺寸以及润湿性均有密切关系[19]。超深致密砂岩气井一般多为高产井，其储层裂缝内流体的流速高、紊流效应明显。扫描电镜结果显示，研究区超深致密砂岩储层裂缝壁面脆弱结构的胶结程度较低，在高流速气流冲刷条件下砂粒受到的拖曳力极易超过脆弱结构的抗张强度，进而造成裂缝壁面出砂。

3.1.2 颗粒撞击剥蚀加剧裂缝壁面出砂

基于土壤侵蚀学分析认为，在风力作用下可动微粒脱离地面后会以漂浮、跳跃或蠕动3种形式移动。其中，以跳跃方式移动的微粒由于重力作用将冲入表层，并重新分配其在跳跃加速运动过程中从气流中得到的大量能量，并可能将一部分难以被侵蚀甚至不可侵蚀的颗粒变为可侵蚀性，这种现象被称为串激效应[20]。风蚀实验结果表明，跳跃的微粒将降低附着于地面的微粒脱离地面需要的附着力，最大可达20%。在超深致密砂岩气井生产过程中，储层裂缝壁面有高速气流通过，其脆弱结构在风蚀作用下脱离裂缝壁面，并在二次沉积过程中撞击壁面，将一部分动能转化为壁面砂粒的动能，从而促进砂粒的剥落。

土壤风蚀的本质是风力侵蚀力、粗糙干扰力和土壤抗蚀力构成的矛盾统一体。将该理论运用于裂缝壁面出砂影响因素分析，认为影响裂缝壁面出砂的主要因素包括气体流速和粘度、裂缝表面粗糙度及其脆弱结构的抗撞击能力。目前流体速度、粘度以及裂缝表面粗糙度是较易于测量的，但是裂缝形态复杂，其壁面脆弱结构的抗撞击能力与岩石性质、胶结程度、温度和工作液浸泡均有关系[15]，因此针对砂粒撞击剥蚀加剧裂缝壁面出砂还需进一步深入研究。

3.2 裂缝壁面出砂对超深致密砂岩储层应力敏感性的影响

压裂过程中支撑剂在裂缝壁面的沉积有利于降低裂缝的应力敏感性[21-22]。应力敏感性评价实验过程中脱落的大部分砂粒并没有随气体排出岩心，而是在裂缝壁面的狭窄处堆积下来。针对宽度适中的裂缝，在有效应力不变的条件下，随着流体流动时间的增加，壁面脱落的砂粒将堵塞裂缝狭窄处，造成裂缝岩心样品渗透率降低。在有效应力增加过程中，随着裂缝闭合，堆积在裂缝狭窄处的砂粒将随着裂缝宽度的变化而发生压缩变形。根据薄片等岩石学分析认为，超深致密砂岩储层胶结物中石英等矿物含量较高，且其硬度较大，在裂缝闭合过程中，堵塞于裂缝狭窄处的砂粒将起到支撑裂缝的作用。虽然砂粒可能出现一定程度的嵌入或变形，但仍可以有效降低裂缝的闭合程度，流动气体仍可以通过残余的高速渗流通道继续流动，这可能是导致中间宽度裂缝岩心样品应力敏感系数较小的原因。

由超深致密砂岩储层裂缝岩心样品应力敏感系数与裂缝宽度的关系（图5）可以看出，对于较小宽度裂缝，气体流动过程中砂粒不易在裂缝内移动，呈现出典型的致密砂岩裂缝应力敏感性；对于中等宽度裂缝，由于大多数脱落的砂粒将随裂缝闭合而被捕获，因此应力增加过程中更多的砂粒将起到支撑作用，从而造成储层中该类裂缝的应力敏感性弱化程度最大；对于较大宽度裂缝，在有效应力增加初期，其渗透率快速降低，与典型致密砂岩裂缝岩心样品的应力敏感性变化趋势一致；但随着有

效应力的增大，裂缝宽度不断减小，气体流动过程中形成的砂粒将被气流带出裂缝，气体流动过程中形成的砂粒并没有起到弱化裂缝应力敏感性的作用，且由于壁面出砂过程中，裂缝宽度略有增加，因此较大宽度裂缝虽然表现出强应力敏感程度，但较典型致密砂岩储层则明显偏弱。根据裂缝内的颗粒架桥规律[23-24]，认为裂缝缝宽为统计脱落砂粒D90的0.5～1倍为中等宽度裂缝，小于该值为较小宽度裂缝，大于该值为较大宽度裂缝。

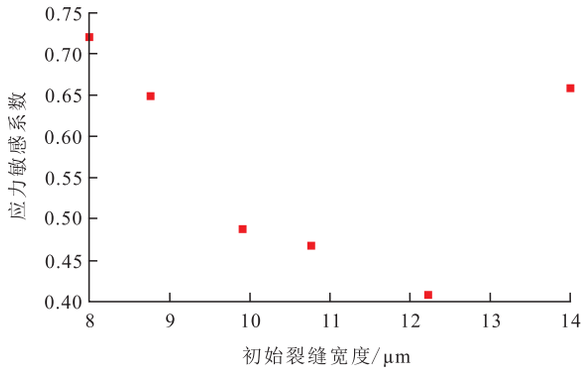


图5　超深致密砂岩储层裂缝岩心样品应力敏感系数与裂缝宽度的关系

Fig.5　Relationship between stress sensitive coefficients and fracture width for fractured samples of ultra-deep tight sandstone reservoirs

4　结论

塔里木盆地超深致密砂岩气藏的储层裂缝应力敏感系数为0.42～0.72，应力敏感程度为中等偏弱—强，较中国典型致密砂岩气藏的应力敏感性偏弱。对比分析超深致密砂岩储层裂缝岩心样品应力敏感性评价实验前、后的裂缝壁面微观特征，认为裂缝壁面出砂是弱化储层裂缝应力敏感性的重要因素。在超深致密砂岩储层形成裂缝后，其裂缝壁面存在半胶结、未胶结的脆弱结构。在气井生产过程中高速流体的冲刷作用下，裂缝壁面砂粒受到的气流拖曳力以及砂粒对壁面的剥蚀作用是裂缝壁面出砂的主要机理。在应力敏感性评价实验过程中，随着有效应力的增加，裂缝趋向闭合，原来沉积于裂缝狭窄处的坚硬砂粒起到支撑作用，在一定程度上保护了裂缝的渗流能力。裂缝壁面出砂对于不同宽度裂缝应力敏感性的弱化程度存在差异，其弱化程度从大到小依次为中等宽度裂缝、较大宽度裂缝和较小宽度裂缝。研究成果对超深裂缝性致密砂岩气藏出砂机理及应力敏感性研究具有重要意义。

参考文献：

[1]　黄娟，叶德燎，韩彧.超深层油气藏石油地质特征及其成藏主控因素分析[J].石油实验地质，2016，38(5)：635-640.
Huang Juan，Ye Deliao，Han Yu.Petroleum geology features and accumulation controls for ultra-deep oil and gas reservoirs[J].Petroleum Geology & Experiment，2016，38(5)：635-640.

[2]　姜辉，樊生利，赵应权，等.超深层致密砂岩储层致密初始期的厘定：以中东鲁卜哈里盆地为例[J].石油实验地质，2016，38(2)：219-223.
Jiang Hui，Fan Shengli，Zhao Yingquan，et al.Initial porosity reduction phase of ultra-deep tight sandstone reservoirs：A case study of the Rub'Al Khali Basin in the Middle East[J].Petroleum Geology & Experiment，2016，38(2)：219-223.

[3]　蔡希源.深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J].石油与天然气地质，2010，31(6)：707-714.
Cai Xiyuan.Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone：an example from gas exploration in the Xujiahe Formation of the western Sichuan Depression，the Sichuan Basin[J].Oil & Gas Geology，2010，31(6)：707-714.

[4]　江同文，滕学清，杨向同.塔里木盆地克深8超深超高压裂缝性致密砂岩气藏快速、高效建产配套技术[J].天然气工业，2016，36(10)：1-9.
Jian Tongwen，Teng Xueqing，Yang Xiangtong.Integrated techniques for rapid and highly-efficient development and production of ultra-deep tight sand gas reservoirs of Keshen8 Block in the Tarim Basin[J].Natural Gas Industry，2016，36(10)：1-9.

[5]　Lei Qun，Xiong Wei，Yuan Jiangru，et al.Analysis of stress sensitivity and its influence on oil production from tight reservoirs[C].Lexington：Eastern Regional Meeting，2007.

[6]　陈奎，任广磊，杨文娟，等.鄂尔多斯盆地大牛地气田盒1段储层应力敏感性及对水平井开发的影响[J].石油与天然气地质，2016，37(2)：267-271.
Chen Kui，Ren Guanglei，Yang Wenjuan，et al.Stress sensitivity of the 1st Member of Xiashihezi Formation and its influences on horizontal well development of Daniudi gas field，Ordos Basin[J].Oil & Gas Geology，2016，37(2)：267-271.

[7]　Chen Dong，Pan Zhejun，Ye Zhihui.Dependence of gas shale fracture permeability on effective stress and reservoir pressure：model match and insights[J].Fuel，2015，139：383-392.

[8]　游利军，康毅力，陈一健，等.考虑裂缝和含水饱和度的致密砂岩应力敏感性[J].中国石油大学学报：自然科学版，2006，30(2)：59-63.
You Lijun，Kang Yili，Chen Yijian，et al.Stress sensitivity of fractured tight gas sands in consideration of fractures and water saturation[J].Journal of China University of Petroleum：Edition of Natural Sciences，2006，30(2)：59-63.

[9]　窦祥骥，廖新维，赵晓亮，等.应力敏感微纳米孔隙储层压裂裂缝反演方法[J].油气地质与采收率，2016，23(2)：76-82.
Dou Xiangji，Liao Xinwei，Zhao Xiaoliang，et al.Inversion method

for hydraulic fracture in stress-sensitiveformation with micro-nano pores[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2016,23(2):76-82.

[10] 雷刚,王昊,董平川,等.非均质致密砂岩应力敏感性的定量表征[J].油气地质与采收率,2015,22(3):90-94.
Lei Gang,Wang Hao,Dong Pingchuan,et al.Quantitative analysis on stress sensitivity of heterogeneous tight sandstone[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2015,22(3):90-94.

[11] 康毅力,张杜杰,游利军,等.裂缝性致密储层工作液损害机理及防治方法[J].西南石油大学学报:自然科学版,2015,37(3):77-84.
Kang Yili,Zhang Dujie,You Lijun,et al.Mechanism and control methods of the working fluid damages in fractured tight reservoirs[J].Journal of Southwest Petroleum University:Science & Technology Edition,2015,37(3):77-84.

[12] 孙璐,刘月田,冯月丽,等.致密油气藏裂缝介质压力敏感分析与计算方法[J].大庆石油地质与开发,2017,36(2):171-176.
Sun Lu,Liu Yuetian,Feng Yueli,et al.Pressure sensitivity analysis and calculating method for the fracture medium of the tight oil reservoir[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2017,36(2):171-176.

[13] 郑爱玲,刘德华.应力敏感对低渗致密气藏水平井压裂开采的影响[J].大庆石油地质与开发,2016,35(1):53-57.
Zheng Ailing,Liu Dehua.Influences of the stress sensitivity on the production of the fractured horizontal well in low-permeability tight gas reservoirs[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2016,35(1):53-57.

[14] 方思冬,战剑飞,黄世军,等.致密油藏多角度裂缝压裂水平井产能计算方法[J].油气地质与采收率,2015,22(3):84-89.
Fang Sidong,Zhan Jianfei,Huang Shijun,et al.A computational method for productivity of arbitrary angular fractured horizontal well in tight oil reservoirs[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2015,22(3):84-89.

[15] Yang Xiangtong,Jin Xiao,Zhang Yang,et al.Investigating the fundamental mechanisms governing solid production in superdeep hot tight gas reservoirs and exploring potential solutions[C].Dubai:SPE Technical Conference and Exhibition,2016.

[16] 兰林,康毅力,陈一健,等.储层应力敏感性评价实验方法与评价指标探讨[J].钻井液与完井液,2005,22(3):1-4.
Lan Lin,Kang Yili,Chen Yijian,et al.Discussion on evaluation methods for stress sensitivities of low permeability and tight sandstone reservoirs[J].Drilling Fluid & Completion Fluid,2005,22(3):1-4.

[17] 宋佳.基于数字化方法的微裂缝特征研究[D].成都:成都理工大学,2011.
Song Jia.The research on micro-fracture characteristics based on digital analysis methods[D].Chengdu:Chengdu University of Technology,2011.

[18] 东振,鲍清英,张义.煤层气井排采阶段煤粉运移条件研究[J].特种油气藏,2015,22(2):143-146.
Dong Zhen,Bao Qingying,Zhang Yi.CBM well coal-powder migration conditions in water drainage gas recovery[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2015,22(2):143-146.

[19] Tronvoll J,Skj A,Papamichos E.Sand production:mechanical failure or hydrodynamic erosion[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1997,34(3):291.

[20] 戚隆溪,王柏懿.土壤侵蚀的流体力学机制(Ⅱ)——风蚀[J].力学进展,1996,26(1):41-55.
Qi Longxi,Wang Boyi.Hydraulic mechanism of soil erosion(Ⅱ)-Wind erosion[J].Advances in Mechanics,1996,26(1):41-55.

[21] 王欣,齐梅,胡永乐.西加盆地B气田致密砂岩储层应力敏感评价[J].特种油气藏,2015,22(2):85-88.
Wang Xin,Qi Mei,Hu Yongle.Evaluation on stress sensitivity of tight sandstone in B gasfield of Western Canada Basin[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2015,22(2):85-88.

[22] 游利军,王巧智,康毅力,等.压裂液浸润对页岩储层应力敏感性的影响[J].油气地质与采收率,2014,21(6):102-106.
You Lijun,Wang Qiaozhi,Kang Yili,et al.Influence of fracturing fluid immersion on stress sensitivity of shale reservoir[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2014,21(6):102-106.

[23] Kang Yili,Xu Chengyuan,You Lijun,et al.Temporary sealing technology to control formation damage induced by drill-in fluid loss in fractured tight gas reservoir[J].Journal of Natural Gas Science & Engineering,2014,20(s3/4):67-73.

[24] 朱金智,游利军,李家学,等.油基钻井液对超深裂缝性致密砂岩气藏的保护能力评价[J].天然气工业,2017,37(2):62-68.
Zhu Jinzhi,You Lijun,Li Jiaxue,et al.Damage evaluation on oil-based drill-in fluids for ultra-deep fractured tight sandstone gas reservoirs[J].Natural Gas Industry,2017,37(2):62-68.

编辑 邹潋滟