

文章编号:1673-9469(2022)04-0100-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.04.014

注液速率对页岩水力压裂起裂的影响规律研究

张同景^{1,2}, 郑永香^{1,2,3*}, 郑超越^{1,2}, 郭相瑞^{1,2}, 冯浩⁴, 梁哲⁵, 张脉^{1,2}

- (1. 河北省金属矿山安全高效开采技术创新中心, 河北 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;
3. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 4. 中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司 第五采油厂, 河北 辛集 052300; 5. 河北省煤田地质局物测地质队, 河北 邢台 054000)

摘要: 为了研究近井筒区域内的裂缝起裂行为, 采用单轴水力压裂设备开展水力压裂试验。采用不同的注液速率开展压裂试验, 结果表明注液速率对近井筒范围内的裂缝起裂时间有显著影响, 随注液速率增加, 起裂时间减小。注液速率对裂缝起裂压力的影响可以忽略, 裂缝起裂与注液总量具有较强的关联性。通过图像对比, 分析了裂缝表面的粗糙程度, 结果表明沿不同位置起裂的裂缝表面粗糙程度不同, 沿层理面起裂的裂缝表面粗糙程度更大。

关键词: 水力压裂; 注液速率; 起裂时间; 裂缝起裂; 破裂面形态

中图分类号: P 642

文献标识码: A

The Influence of Injection Rate on Initiation of Hydraulic Fractures in Shale

ZHANG Tongjing^{1,2}, ZHENG Yongxiang^{1,2,3*}, ZHENG Chaoyue^{1,2}, GUO Xiangrui^{1,2},
FENG Hao⁴, LIANG Zhe⁵, ZHANG Mai^{1,2}

- (1. Hebei Technology & Innovation Center on Safe and Efficient Mining of Metal Mine, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 4. No. 5 Oil Production Plant, Huabei Oilfield Company, CNPC, Xinji, Hebei 052300, China; 5. Geophysical Geological Team of Hebei Coalfield Geology Bureau, Xingtai, Hebei 054000, China)

Abstract: In order to study the fracture initiation behavior in the near-wellbore area, hydraulic fracturing tests were carried out by uniaxial hydraulic fracturing equipment. The results show that the injection rate has a significant influence on the initiation time of fractures in the near-wellbore range. And the initiation time decreases with the increase of injection rate. The influence of injection rate on fracture initiation pressure can be ignored. Fracture initiation has strong correlation with the total amount of injection fluid. Besides, the roughness of fracture surface was analyzed through image comparison. The results show that the roughness of fracture surface is different along different positions. The roughness of fracture surface is larger along bedding plane.

Key words: hydraulic fracturing; injection rate; initiation time; fracture initiation; fracture surface morphology

水力压裂是页岩开发的关键技术, 通过水力压裂可以在储层中形成有效的裂缝网络, 提高储

层的渗透率^[1-3]。水力压裂物理实验常用的方式为真三轴水力压裂实验, 国内外采用真三轴水力

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: “十三五”国家油气重大专项(ZX201705037001); 河北省自然科学基金青年项目(E2021210036); 2021年大学生创新创业训练计划项目(2021101070223)

作者简介: 张同景(1998-), 男, 河北廊坊人, 硕士研究生, 从事岩石力学方面的研究。

* 通讯作者: 郑永香(1991-), 男, 河北邢台人, 博士, 讲师, 从事低渗储层改造方面的研究。

压裂设备针对不同的储层(如页岩,煤岩,低渗砂岩等)开展了系列试验^[4-6],对水力压裂作用下的裂缝形成规律进行了深入探讨。目前影响水力压裂裂缝起裂和扩展的主要因素有地应力、孔隙压力、层理及天然裂缝、射孔参数、施工排量^[7-8]。赵熙等^[9]采用数值模拟方法分析了不同水平应力比和孔射布置方式对水力压裂起裂和扩展的影响;刘海龙等^[10]研究了定向射孔对水力压裂起裂的影响;陈灿等^[11]研究了压裂液的黏度对裂缝的起裂压力和扩展半径的影响。目前已有研究主要通过大型真三轴水力压裂设备和数值模拟方法对裂缝的裂缝网络形态进行研究,但是单独针对井周裂缝起裂行为研究的实验较少,因此开展近井筒裂缝起裂行为的研究对认识裂缝扩展具有重要意义。

注液速率是压裂施工工艺的重要参数,厘清注液速率对裂缝起裂行为的影响规律对压裂施工方案的设计具有重要的参考价值^[12]。因此本文采用单轴水力压裂设备,设计不同的注液速率,分析不同注液速率下水力裂缝的起裂特征。以期压裂施工工艺的设计过程提供参考。真三轴水力压裂设备对试样的要求较高,操作程序相对繁琐,试验成本相对较高。虽然真三轴试验更能反映地下岩体的真实压力状态,但在研究水力裂缝的起裂行为时,重点关注于近井筒的裂缝扩展行为,单轴水力压裂试验需要的试样小,主要针对裂缝的起裂行为和近井筒裂缝特征。因此单轴水力压裂试验在研究页岩的起裂特征方面具有一定的优势。本文将采用单轴水力压裂设备对近井筒范围内的裂缝起裂行为进行探讨。

1 试验设备与方案

1.1 试验设备

本试验在中国科学院武汉岩土力学研究所采用改造后的单轴水力压裂设备完成。该设备可施加轴向压力和侧向围压,在试样中部可注液压裂。试验设备简图如图1(a)所示。试验主要考虑轴向压力。轴向压力通过伺服加压泵加载,且可以通过电脑系统维持压力稳定。进液系统通过流量控制完成,可实现流量范围为0.1~10 mL/min的注液。具体设备如图1(b)所示。主要包括加载系统、控制系统和监测系统。通过监测系统可记录注入压力。

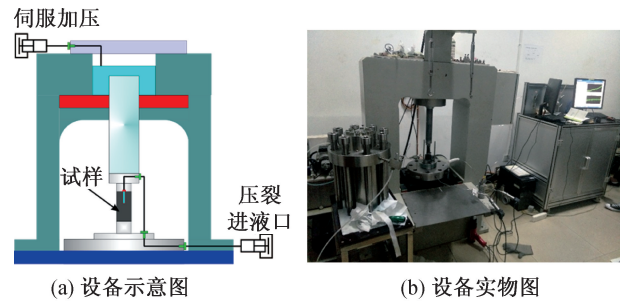


图1 单轴水力压裂设备

Fig. 1 Equipment of hydraulic fracturing

1.2 样品制备

本试验采用圆柱标准试样进行测试。试样按照垂直于层理方向钻取,尺寸为直径25 mm,高50 mm。在试样一端钻孔,钻孔深度为30 mm,孔径为3 mm。钻孔后安装封头。封头埋入试样中的深度为25 mm。封头通过环氧树脂固定,固定后养护时间应大于2 h。其内部形态如图2(a)所示。岩样可以分为固井段和裸眼段。由于封头材料为钢管,强度较高。故裂缝将首先从裸眼段起裂。固井完成后试样如图2(b)所示。

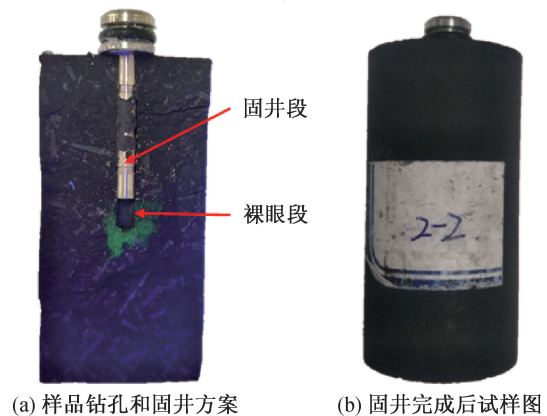


图2 试样固井方案

Fig. 2 Sample cementing scheme

1.3 试验方案

本次试验采用单轴加压模式。轴向压力为5 MPa,选择不同的注液速率,研究注液速率对裂缝的起裂时间和起裂压力的影响。注液速率分别为0.5~4 mL/min。本试验中的压裂液为清水。试验的具体实施方案汇总见表1。

表1 试验方案表

Tab. 1 Protocol table for the experiment

| 编号 | 轴压/MPa | 注液速率/(mL·min ⁻¹) |
|-----|--------|------------------------------|
| 1-5 | 5 | 0.5 |
| 1-6 | 5 | 1 |
| 1-7 | 5 | 2 |
| 1-8 | 5 | 4 |

除上述试验外,本试验中曾尝试增加围压和改变轴压进行测试。但是在增加围压后,起裂压力超过设备极限或注液压力过高导致压裂液从封头处漏液,最终试验失败。但其结果对本文仍具有指导意义,因此本文中也将针对失败的试验结果进行讨论。此外,试验中应注意轴压的控制。当轴压过大时,导致封头处应力集中,岩样受到应力的作用而劈裂,导致试验失败。

2 结果与分析

2.1 页岩裂缝的起裂形态

随着压裂液注入,井筒内压力升高。当注液压力达到试样的起裂压力后,试样开裂。试样开裂后的形态如图3所示。由图可知,裂缝为竖向贯穿裂缝,裂缝穿过岩样中心。在试样1-5,1-6和1-7中,试样中只含有一条竖向贯穿裂缝,裂缝沿层理面开裂。试样1-8中,除沿层理面开裂外,在垂直于层理面方向有一条竖向贯穿裂缝。

取含有单条裂缝和多条贯穿裂缝的试样,如图4所示。图中左侧为顶端的裂缝形态,中部为试样实物照片,右侧为试样的侧面展开图。右侧图中只展示含裂缝部分,角度为从左侧图中心上方

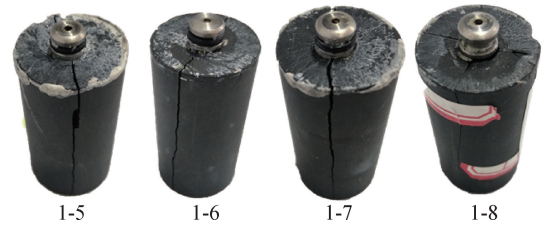


图3 试样的破坏形态
Fig. 3 Failure state of samples

为0度起始点逆时针旋转。由图4(a)中只有一条垂向贯穿裂缝,并通过岩样中心。图4(b)为1-8的形态,该试样注液速率为4 mL/min,注液速率大,裂缝除沿层理面的贯穿裂缝外,还有一条垂直于层理面的贯穿缝。1-8中共有4条裂缝。

综上,裂缝起裂主要沿着层理面开裂。这是由于层理面的强度低于非层理面。在低注液速率下,试样破坏后只含有一条竖向贯穿缝,裂缝形态单一。在高注液速率下,破坏后的试样包含4条裂缝,裂缝形态变得更为复杂。因此可以得到注液速率对裂缝起裂形态的影响,即适当提高注液速度可以增加裂缝的起裂条数,增加裂缝网络的复杂性。

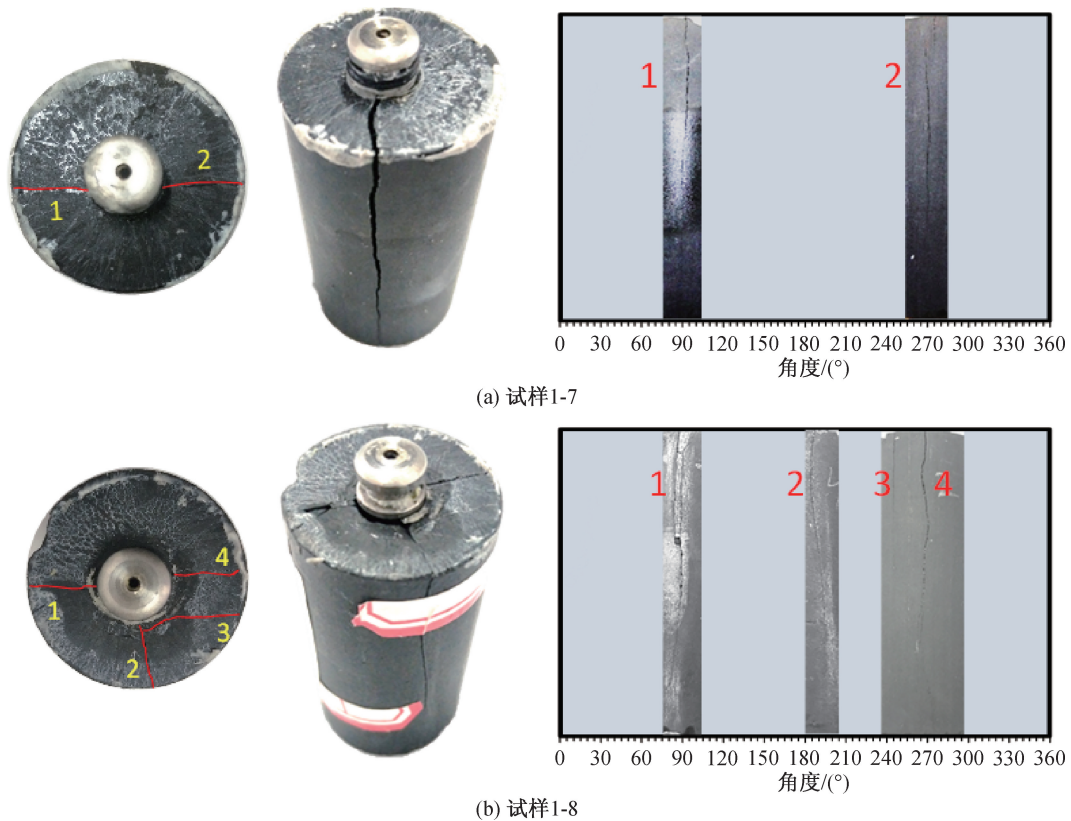


图4 外表面破坏特征

Fig. 4 Failure characteristics of outer surface

裂缝起裂后将继续沿着起裂处继续延伸,初始的裂缝起裂条数对后续形成的裂缝网络具有关键作用。当只有一条贯穿裂缝时,随后扩展过程中只能形成一条双翼裂缝,不能形成有效裂缝网络。当含有多条裂缝网络时,随后的扩展过程更容易形成复杂裂缝网络。即使裂缝起裂方向与应力方向不一致,但这些裂缝会随着扩展发生方向偏转,其仍有机会保持多条裂缝扩展。并且,在多条裂缝扩展过程中,裂缝相互干扰,更有利于形成复杂裂缝网络。因此,在生产过程中应合理控制注液速率,使裂缝起裂时产生更多初始裂缝,为形成裂缝网络提供基础。

2.2 页岩压裂起裂的影响因素

起裂压力和起裂时间是页岩起裂的主要特征。将四种不同注液速率下的注液压力曲线绘于图 5 所示。由图可知起裂压力约为 30 MPa,且注液速率越大,起裂所需时间越短。将起裂时间与注液速率的关系绘于图 6(a)。由图可知,随注液速率增加,起裂时间缩短。在注液速率较低时,增大注液速率会明显缩短起裂时间。当注液速率较大时,提高注液速率对缩短起裂时间的影响不大。由于注液总量与注入时间直接相关,因此将起裂时注入的压裂液总量与注液速率绘于图 6(b)。由图可知,起裂时的注液总量随注液速率的增加略有增加,但是其差异极小。考虑注液管线中的流体压力传递等因素的影响,可以认为起裂时的注液总量总体持平,注液速率对起裂时的注液总量的影响有限。

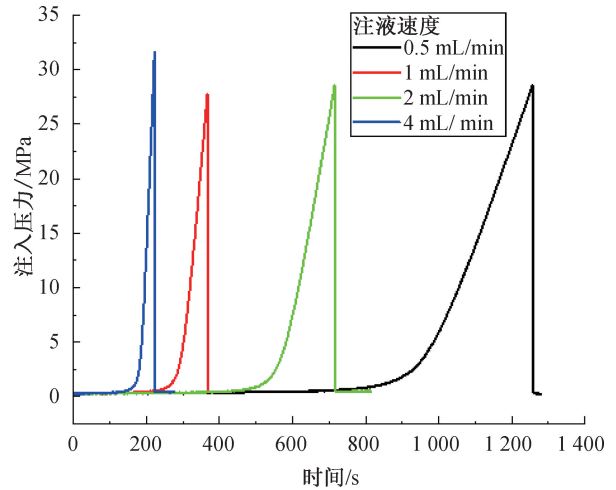


图 5 不同注液速率下的压力曲线

Fig. 5 Pressure with different injection rate

起裂压力是压裂施工中的重要参数。图 7 中为起裂压力与注液速率之间的关系。在 4 种不同注液速率下,起裂压力分别为 28.6、28.6、27.8 和 31.6 MPa,起裂压力随注液速率的变化不明显。这说明注液速率的变化对起裂压力的影响很小。综合注液速率与注液总量的关系,可以推测,当井筒内的液体总量达到一定体积时,注液压力达到页岩起裂压力,页岩发生开裂。根据田小鹏^[13]对同批次页岩进行巴西劈裂试验测得的抗拉强度,该批次页岩的抗拉强度约为 10 MPa。本试验的起裂压力为 27 MPa 到 31 MPa,页岩的起裂压力明显高于页岩的抗拉强度。

上述提到,本次试验也尝试通过增加围压测试页岩的起裂压力,压力曲线如图 8。该方案中对

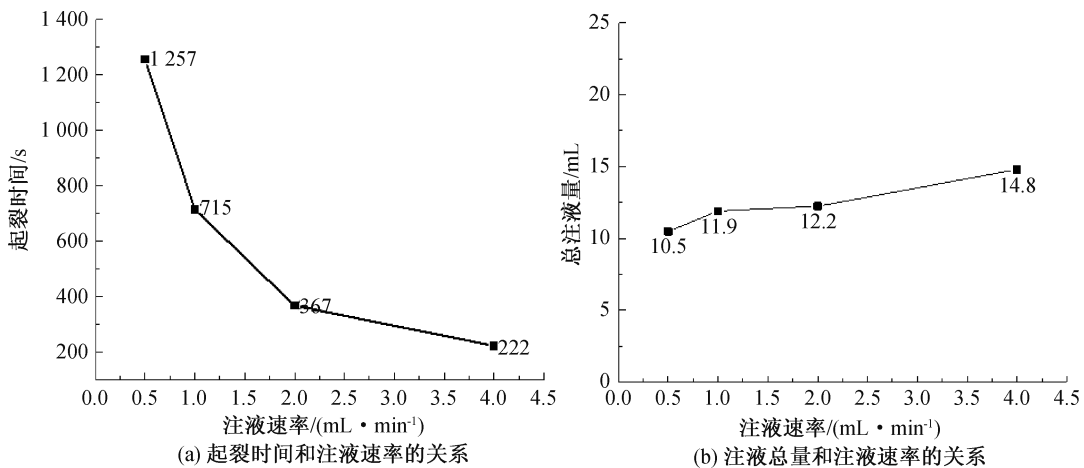


图 6 注液速率对起裂时间的影响

Fig. 6 Influence of injection rate on initial time

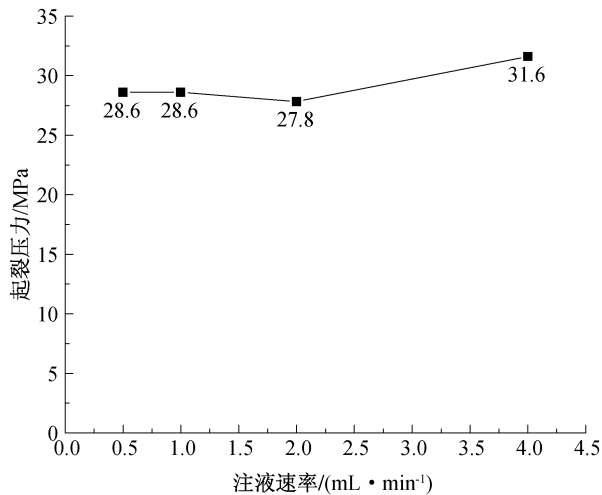


图7 起裂压力与注液速率之间的关系

Fig. 7 Relationship between initial pressure and injection rate

样品施加 5 MPa 围压,不施加轴压。当注入压力达到 35.89 MPa 时,压裂液从压头处漏出,页岩未发生起裂。该试验未能测得页岩在围压作用下的起裂压力,由于试样未起裂,所以试样的起裂压力大于 35.89 MPa。

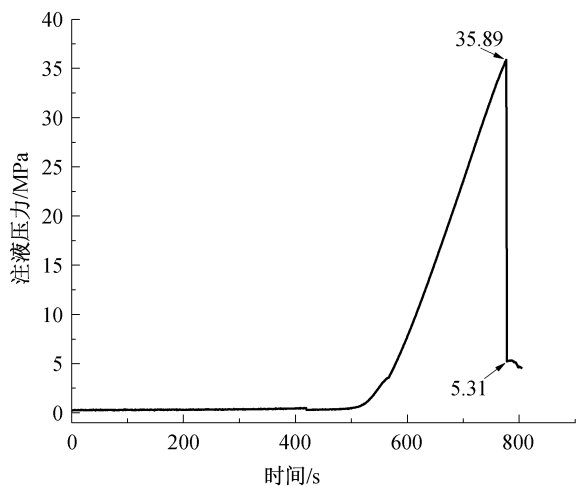


图8 注液压力曲线

Fig. 8 Injection Pressure Curve

虽然在围压条件下岩样未能起裂,但是该结果仍能够证明样品的起裂压力大于最小主应力与抗拉强度之和。因注液后试样内外壁均受到流体压力作用,该问题可近似认为是厚壁筒问题。根据厚壁筒问题^[14],外部围压作用在厚壁筒上的环向应力为:

$$\sigma_{\theta} = -\frac{b^2 p_2}{b^2 - a^2} \left(\frac{a^2}{r^2} + 1 \right) \quad (1)$$

式中, σ_{θ} 为环向应力,MPa; b 为外围半径,m; a 为内壁半径,m; r 为计算点处距中心点距离,m; p_2 为

作用于外筒壁的压力,MPa。

本文中,试样外壁(围)半径为 12.5 mm,内径(壁)半径为 1.5 mm。计算内壁的应力,因此 r 取 1.5 mm,施加的围压为 5 MPa。将相关参数代入公式(1),内壁处的环向压力 $\sigma_{\theta} = 2.03p_2 \approx 10$ MPa。环向压力与抗拉强度(约 10 MPa)之和为 20 MPa。试验中测得的 35.89 MPa 大于环向压力与抗拉强度之和。环向压力可视为起裂面上的法向应力,而地层中裂缝起裂面垂直于最小主应力。因此,样品的起裂压力大于最小主应力与抗拉强度之和,这与无围压条件下的结论类似。

基于上述讨论,认为可能的原因有轴向压力、裸眼井段长度和试样尺寸三个原因。由于本次试验设备及试样数量的限制,未能够对该问题进行深入探讨。但该问题对于研究水力压裂的起裂压力具有重要意义,可作为未来的研究方向。

2.3 起裂后的裂缝表面形态

试验中页岩多沿着层理面破坏,但同时也有沿着非层理面破坏的试样。结果发现不同起裂面的粗糙程度不同。图9展示了不同破裂形式下的裂缝表面形态。首先分析左侧两图,这两个试样均沿着层理面破坏。可看出,沿层理面破坏的裂缝表面更为粗糙,表面起伏特征更加突出。右侧两图为同一岩样中沿不同面的破坏特征。可以看出,沿非层理面破坏的表面较沿层理面破坏的表面光滑,粗糙度低。

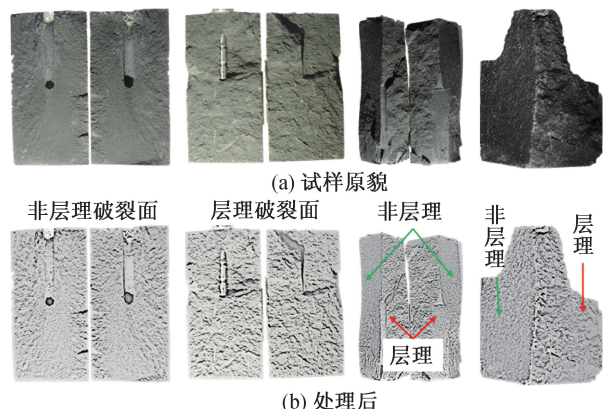


图9 裂缝表面形态

Fig. 9 Morphology of fracture surfaces

将破坏表面进行局部放大,放大后的表面如图10所示。由图可知,沿非层理面破坏面光滑均匀,破坏颗粒较小。而沿层理面破坏的表面起伏不平,破坏颗粒较大,有明显的突出特征。

综上,在近井筒范围内,页岩起裂时沿不同表

面破坏的表面粗糙度不同。当沿着层理面破坏时,破坏面粗糙。当沿着非层理面破坏时,破坏面的表面较为光滑。裂缝表面的粗糙度对自支撑裂缝的渗透率有显著的影响。因此,不同破坏形式下的渗透率也将会有较大差异。

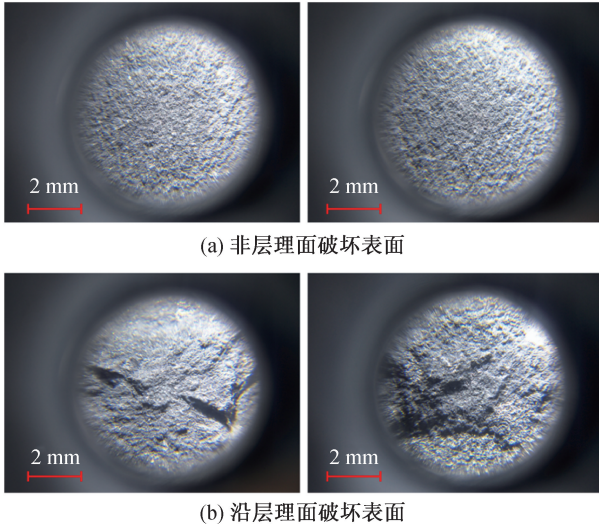


图 10 裂缝表面的放大图

Fig. 10 Enlarged view of fracture surfaces

3 结论

本文通过单轴水力压裂试验测定了页岩的起裂行为特征。试验中考虑了不同注液速率对起裂压力和起裂时间等因素的影响,结果表明:

1) 注液速率对起裂时间的影响较大。注液速率较低时,增大注液速率会明显缩短起裂时间。当注液速率较大时,提高注液速率对缩短起裂时间的影响较小;注液速率对起裂压力和起裂时的注液总量的影响程度有限,页岩的起裂主要受页岩自身的起裂压力的影响。

2) 单轴水力压裂试验的页岩起裂压力大于巴西劈裂试验测得的起裂表面的抗拉强度。其原因或与轴向压力、裸眼井段长度和试样尺寸等因素有关。

3) 在近井筒范围内,页岩破坏时不同起裂面的粗糙程度不同。沿层理面破坏的裂缝表面更为粗糙,沿非层理面破坏的表面较为光滑,粗糙度低。

参考文献:

- [1] 郑永香,刘建军. 注水条件下近裂缝带的地应力演化规律[J]. 大庆石油地质与开发,2020,39(1):62-73.
- [2] 马天寿,彭念,陈平,等. 页岩气水平井井壁裂缝起裂力学行为研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2019,41(6):87-99.
- [3] 孟英峰,刘厚彬,余安然,等. 深层脆性页岩水平井裸眼完井井壁稳定性研究[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2019,41(6):51-59.
- [4] 付海峰,刘云志,梁天成,等. 四川省宜宾地区龙马溪组页岩水力裂缝形态实验研究[J]. 天然气地球科学,2016,27(12):2231-2236.
- [5] WANG Y, LI C H, HU Y Z, et al. Laboratory Investigation of Hydraulic Fracture Propagation Using Real-Time Ultrasonic Measurement in Shale Formations with Random Natural Fractures [J]. Environmental Earth Sciences, 2017,76(22):768.
- [6] DEHGHAN A N, GOSHTASBI K, AHANGARI K, et al. The Effect of Natural Fracture Dip and Strike on Hydraulic Fracture Propagation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2015,75:210-215.
- [7] 史 璨,林伯韬. 页岩储层压裂裂缝扩展规律及影响因素研究探讨[J]. 石油科学通报,2021,6(1):92-113.
- [8] 全少凯,高德利. 水力压裂基础研究进展及发展建议 [J]. 石油钻采工艺,2019,41(1):101-115.
- [9] 赵 熙,戴 涛,鞠 杨,等. 储层射孔压裂裂缝起裂与扩展的数值分析[J]. 采矿与安全工程学报,2016,33(3):544-550.
- [10] 刘海龙,张 磊,谢 涛,等. 定向射孔水力压裂起裂压力研究[J]. 石油机械,2018,46(9):63-68.
- [11] 陈 灿,刘 贤,肖洪天. 塔山煤矿坚硬顶板水力压裂裂缝扩展规律研究 [J]. 矿业研究与开发,2020,40(9):75-80.
- [12] ZHENG Y, LIU J, ZHANG B, et al. A 3d Numerical Simulation of Hydraulic Fracturing in Orthogonal Joints Formation Based on Block Discrete Elements Method [C]//Arma-cupb-19-4264; American Rock Mechanics Association,2019:8.
- [13] 田小鹏. 川南地区页岩破坏模式及参数的各向异性试验研究[D]. 成都:西南石油大学,2019.
- [14] 赵均海,汪梦甫. 弹性力学及有限元[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2003.

(责任编辑 周雪梅)