

页岩气藏储层压裂实验评价关键技术

付永强 马发明 曾立新 余朝毅 陈 艳
中国石油西南油气田公司采气工程研究院

付永强等.页岩气藏储层压裂实验评价关键技术.天然气工业,2011,31(4):51-54.

摘 要 页岩气藏勘探开发潜力巨大,因其基质具有超低渗透特点,使得开发过程中需要进行大规模水力压裂,裂缝网络是获得工业性气流的关键。页岩气井的缝网压裂设计有别于常规低渗透砂岩储层压裂设计,特殊的室内实验评价技术是缝网压裂设计的重中之重。为此,从常规的压裂实验评价入手,分析对比了致密砂岩气与页岩气储层力学性质特征,针对页岩岩石脆性特征以及储层岩心敏感性等实验评价关键技术,开展了大量的实验评价研究,并与现场压裂缝高示踪剂监测、地面微地震裂缝监测结果进行了对比分析。所取得的认识可为页岩储层实验评价分析及缝网压裂优化设计提供参考。

关键词 页岩气 储集层 改造 实验 评价 缝网压裂 优化设计 压裂液

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2011.04.012

1 页岩储层脆性评价

实验结果表明,岩石的脆性是页岩缝网压裂所考虑的重要岩石力学特征参数之一。页岩在压裂过程中只有不断产生各种形式的裂缝,形成裂缝网络,气井才能获得较高产气量,这有别于常规气藏压裂设计。裂缝网络形成的必要条件除与地应力分布有关,岩石的脆性特征是内在的重要影响因素。脆性特征同时也决定了页岩压裂设计中液体体系与支撑剂用量选择。根据北美页岩压裂实践经验,国外学者^[1]给出了岩石脆性与压裂裂缝形态的关系(图 1),同时建议压裂设计中根据岩石脆性,优选液体体系和支撑剂(表 1)。

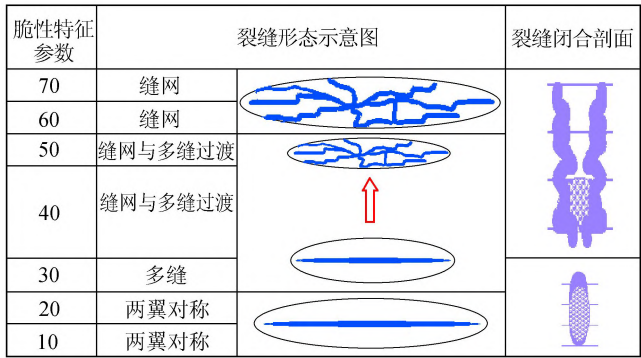


图 1 岩石力学脆性与裂缝形态的关系图

表 1 岩石力学脆性对压裂设计指导表

脆性特征参数	液体用量	支撑剂浓度	支撑剂用量
70	多	低	少
60	随着脆性增加由少变多	随着脆性增加由高变低	随着脆性增加由多变少
50			
40			
30			
20			
10	少	高	多

笔者对四川盆地页岩气储层的岩心开展了研究,并将岩石力学性质与四川盆地上三叠统须家河组致密砂岩储层物性进行对比。表 2 是致密砂岩岩石力学物

表 2 页岩气区块与四川盆地须家河组致密砂岩储层岩石力学平均实验结果比较表

区块名称	井深/m	抗压强度/ MPa	弹性模量/ 10 ⁴ MPa	泊松比
X 构造须二段	2 140~2 152	181.221	2.408	0.198
Y 构造须二段	2 213~2 246	205.556	2.562	0.172
Z 构造须二段	2 191~2 345	197.693	2.387	0.182
W 构造须六段	2 359~3 596	369.146	4.878	0.208
页岩	2 855~2 850	330.157	3.444	0.212

性与页岩力学物性的对比结果。虽然从该表能够找出的是页岩实验结果与其他常规气藏岩心实验结果数值之间的差异,但这种差异显然无法解释页岩的特殊性。

将页岩岩心与致密砂岩岩心实验过程中的应力—应变关系曲线进行对比时,能够初步揭示出页岩的特殊性(图 2)。

从图 2 中可以看出:从初始加载到岩心破裂,页岩岩心的应变曲线斜率变化很小,岩心应力—应变关系曲线近似为一条直线,曲线中的孔隙裂隙压实阶段、弹性变形阶段、体积应变不变阶段以及岩石产生失稳破坏体积应变明显增加阶段等没有明显的界线,表现出了较强的脆性特征。实验计算得到了 2 个页岩储层的岩石脆性参数,并投影在北美地区岩石力学参数与脆性特征关系图版上(如图 3 所示,大圆形符号表示层组 A,三角形符号表示层组 B)。图版中越往左下区域延伸,代表岩石脆性越好,越往右上区域延伸,代表岩石脆性越差。从图中可明显看出:该井层组 A 平均脆性比层组 B 要好,在水力压裂过程中,层组 A 形成网状裂缝的几率以及网状裂缝发育程度应优于层组 B。

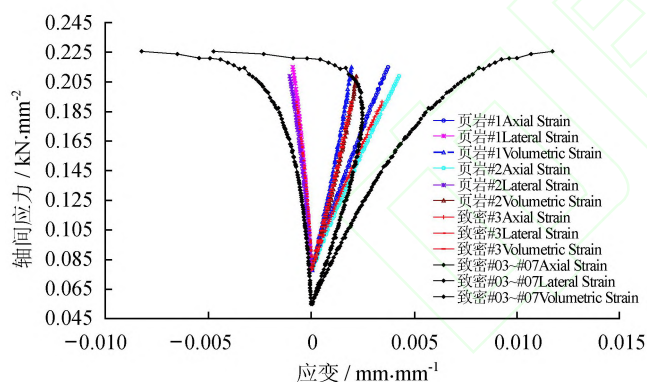


图 2 页岩与致密砂岩应力应变关系对比图

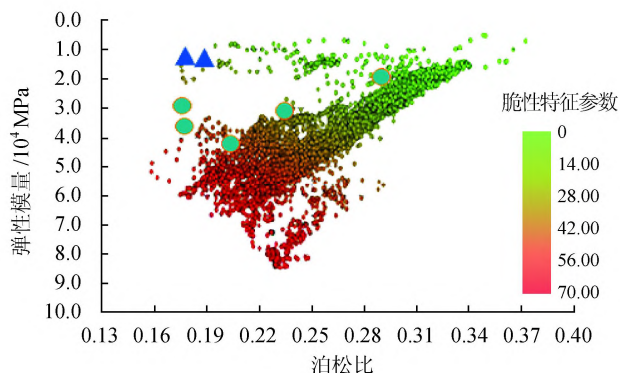


图 3 四川盆地页岩气储层 A、B 层组岩石脆性对比图

根据页岩脆性的实验结果,计算了四川盆地 Wx 井的岩石脆性参数剖面(图 4)。从图 4 可以看出:页

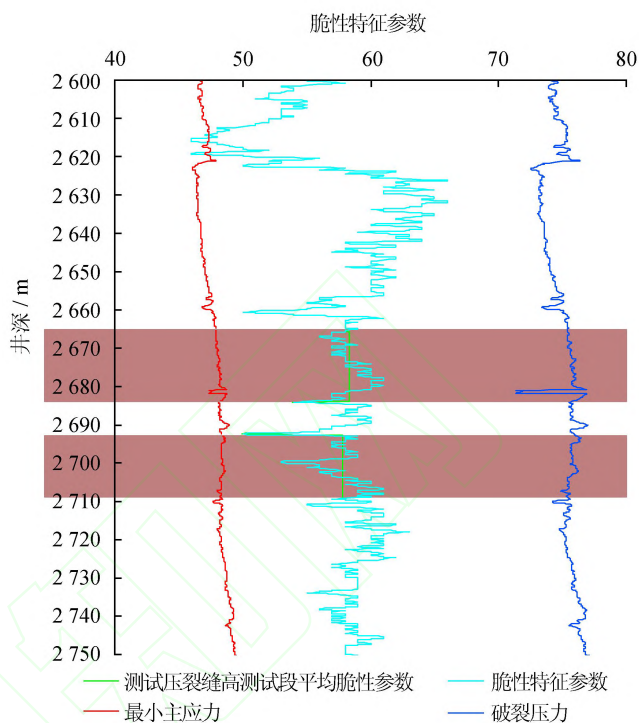


图 4 Wx 井岩石脆性参数剖面图

(注:咖啡色阴影为解释裂缝高度)

岩的脆性特征在纵向上存在较大的差异,而这种脆性特征的差异决定了纵向上各小层段形成网状裂缝的完善程度,脆性越大,越容易形成网状裂缝,而脆性越小,意味着更好的塑性特征,形成网状裂缝的可能性越小,且一定程度上阻碍了网状裂缝的扩展。图 4 中压裂示踪剂缝高测试结果表明,近井附件裂缝网络的高度受控在高塑性岩层中。从图 5 监测结果分析,破裂点分布主要集中在上射孔段,该段对应的脆性指数较大;远井处裂缝网络缝高延伸主要存在于脆性弱的塑性遮挡层之间,这与近井裂缝缝高示踪剂测试解释结果的认识特级参数一致。

通过对比该井不同页岩层位的脆性,计算出该井层组 A 储层脆性指数明显比层组 B 高(图 6)。相同规模的压裂对比下,微地震裂缝监测证实层组 A 储层压裂更易在井周围形成缝网,主裂缝延伸方向不明显,裂缝网络更为复杂;而脆性较差的层组 B 储层,较易形成以主缝为特征的缝网,主裂缝延伸方向明显,与区域最大地应力方向基本一致(图 7)。

2 页岩储层敏感性与伤害评价

2.1 天然裂缝和层理伤害与评价

虽然页岩基质是无法提供气体流动通道,但天然裂缝和由应力释放形成的层理缝是流体渗流的主要通

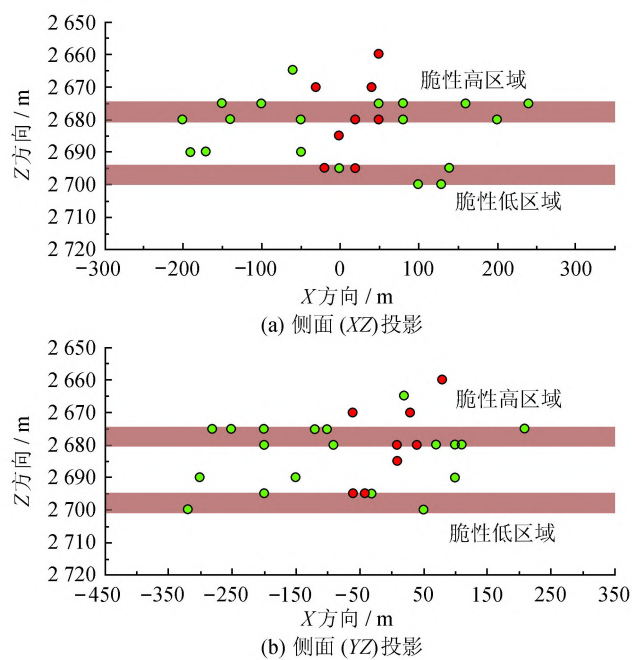


图 5 Wx 井地面微地震缝高监测图
(注:咖啡色矩形框代表射孔段位置)

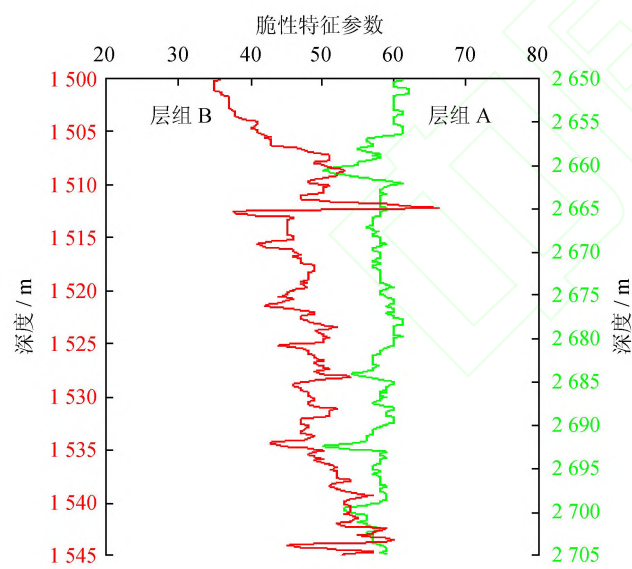


图 6 Wx 井不同层组岩石脆性剖面对比图

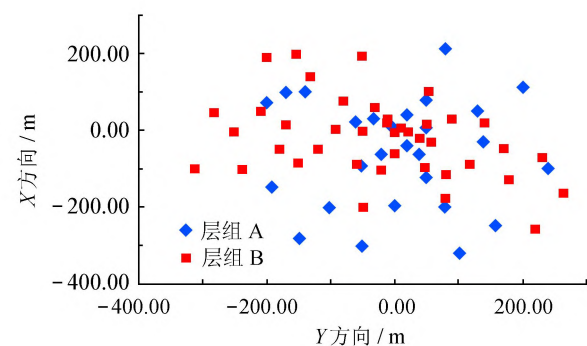


图 7 Wx 井压裂不同层组微地震裂缝形态监测图

道。因此对于页岩气压裂而言,岩心伤害和敏感性实验应该注重对天然裂缝伤害和评价工作。由于天然裂缝和层理缝的存在,页岩岩心的渗透率可以提高为 0.01~0.001 mD 的数量级(图 8),这就为在目前工艺技术水平下工业开采页岩气提供了可能。

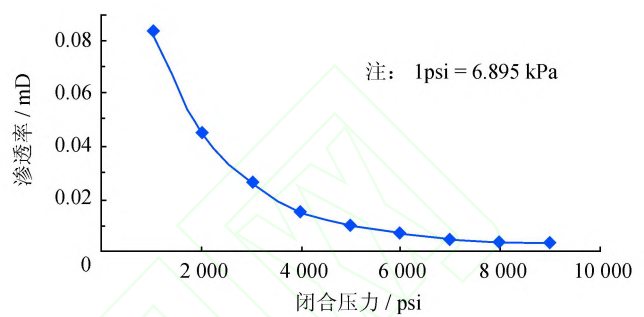


图 8 页岩岩心天然裂缝渗透性与闭合压力关系图

2.2 页岩敏感性自吸实验

岩心矿物成分和黏土矿物成分分析是进行敏感性评价和储层损害评价的基础工作。通过对页岩 X 射线衍射实验,可以获得全岩矿物成分及黏土矿物成分(图 9)。按照常规气藏敏感性评价模式,如果根据上述实验结果及各种黏土矿物水化膨胀能力的大小推断,该区域储层的水敏特征应是中等偏强,而水锁特征应非常严重。然而,研究表明:常规气藏中类似这种黏土矿物分布特征的水锁伤害可能导致储层的有效相对渗透率下降到原来的 10% 以下,但页岩的自吸实验却表现出了不同的结果。

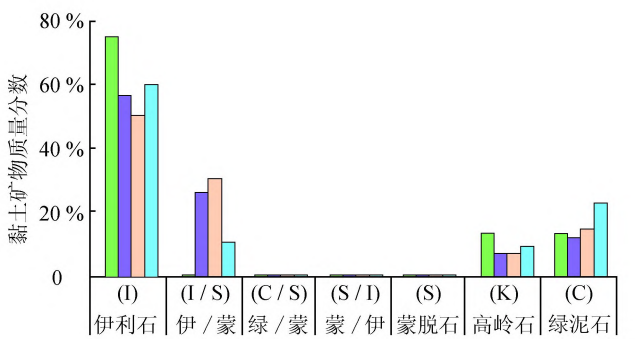


图 9 页岩岩心黏土矿物组成图

采用 2 个不同层系的页岩岩心开展自吸评价实验。层组 A 与层组 B 在矿物组成和岩石力学性质上有着明显差异。自吸评价实验共使用了 7 种液体(图 10、11),而 2 个层组页岩岩心的实验却表现出了非常一致的规律:初期的吸液量最大,在前 3 min 吸液速率相对较大,而 3 min 后自吸曲线趋于平直,吸液量基本

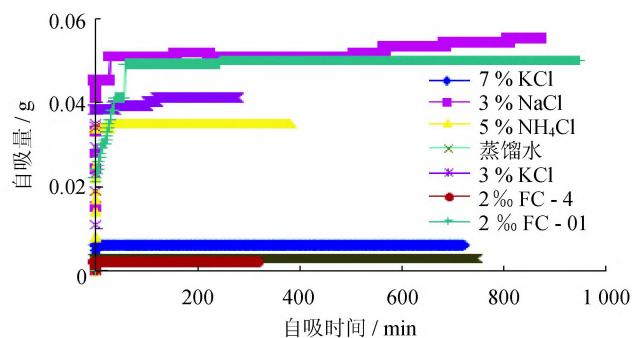


图 10 层组 B 页岩岩心自吸实验图

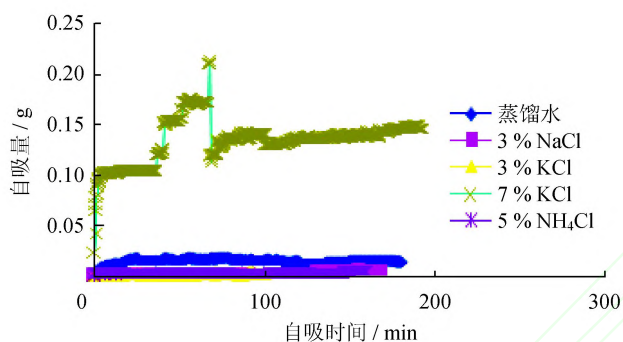


图 11 层组 A 页岩岩心自吸实验图

趋于零,总的吸液量较少。7 种液体中,未加任何添加剂的蒸馏水自吸量最小,且在最短的时间内吸液量即趋于零。按照国外学者^[2]推荐自吸实验 (Capillary Suction Time) 评价标准,蒸馏水与 2%~3% KCl 实验 CST 比值小于 1 储层没有敏感性;1~1.5 之间储层中等敏感;大于 1.5 储层具有强敏感性。通过对 2 个层系对比,层组 A 的吸液量明显高于层组 B。采用蒸馏水与 2%~3% KCl 自吸实验 (CST) 分析来看 (图 12、13),层组 A 的 CST 比值大于 2,属于强的水敏地层,而层组 B 的 CST 比值小于 1,属于敏感性较弱的储层。这样通过自吸实验可以区分不同层系页岩的敏感性,为进一步有针对性优化压裂液体系提供了有效评价手段。

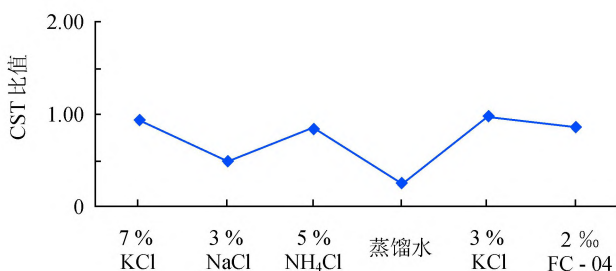


图 12 层组 B 页岩 CST 分析图

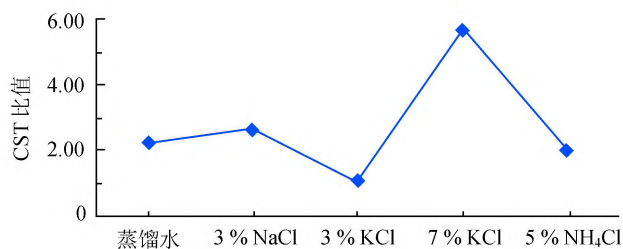


图 13 层组 A 页岩 CST 分析图

3 结论

页岩储层超低渗透性要求在水力压裂中形成大规模网状裂缝,形成一定规模的可解析渗流区域,而形成缝网的外因是地应力的分布,内因是岩石的脆性。缝网压裂设计中,页岩的脆性特征以及脆性剖面的实验评价认识有助于更好地选择射孔段,认识裂缝高度的延伸,提高压裂缝网波及体积,提高单井产量。页岩与常规油气储集层岩石相比,所具有的极端致密的特征使得常规的液体伤害和敏感性分析不能完全指导压裂设计优选液体性能。页岩的天然裂缝和层理伤害与评价,以及页岩的敏感性评价有助于认识裂缝的渗透性能、筛选液体,为缝网压裂优化设计提供参考依据。

页岩气的勘探开发在国内刚刚起步,许多领域还需要进一步攻关。虽然针对页岩压裂的特殊模式以及页岩的敏感性特征探索了页岩气藏储层压裂实验评价的关键技术,尤其是在页岩脆性特征对裂缝形态的影响、页岩岩心敏感性评价方法上,初步获得了一些认识,但仍需要开展大量的室内实验评价和现场施工分析、验证。特别是在页岩压裂形成缝网的前提条件、延伸机理、控制机理等方面仍需开展大量研究。

参 考 文 献

- [1] WANG FRED. Production fairway: speed rails in gas shale [C/OL]//7th Annual Gas Shale Summit, 6-7, 2008 Dallas, Texas, USA. <http://www.HPDI.com>.
- [2] CHONG K K. A completions roadmap to shale-play development: a review of successful approaches toward shale-play stimulation in the last two decades [C]//paper 130369-MS Presented at the International Oil and Gas Conference and Exhibition, 8-10 June 2010, Beijing, China. New York: SPE, 2010.