

非常规致密气裂缝扩展及压裂工艺在气田经济发展中的重要作用

孙泽宁（中联煤层气有限责任公司，山西 吕梁 033200）

魏志鹏（中海油田服务股份有限公司油田生产事业部，山西 吕梁 033200）

摘要：致密气开发成本高、难度大，现有工艺经济效益较低。为了经济有效的开发非常规致密气藏，通过地质静态资料、裂缝四维影像监测资料与压裂施工曲线，认识压裂井的裂缝参数及区域地应力方向，明确砂体展布及天然裂缝发育情况，分析压裂过程中裂缝延伸特征，总结主力层位的裂缝起裂规律，针对性优化不同层位的压裂工艺，提升压裂效果，追求经济效益最大化，实现气田的经济高效开发。

关键词：经济发展；致密气藏；油田经济

0 引言

山西临兴区块致密气资源量丰富，但目前开发阶段存在很多问题，部分实施压裂增产措施的单井，实际产能差异较大，与地质认识不符。鉴于储层物性较差、均质性较强，现有的压裂工艺开发成本高，实际效果较差。为实现致密气储层的经济有效开发，需明确压裂过程中砂岩的破裂机理与裂缝展布形态，制定有针对性的压裂优化方案，从而提升单井产能，追求效益最大化，实现开发的经济性，有助于推动区块的深入开发。

为实现以上目标，本文结合区块已实施井的地质静态资料、裂缝四维影像监测资料与压裂施工曲线，对区块地应力特征进行研究，分析压裂过程中裂缝延伸特征，总结太原组、石盒子组等主力层位的裂缝起裂规律，进而优化压裂工艺，提高最大破裂体积，充分释放致密气井产能。

1 研究区概况及地应力特征

区块位于鄂尔多斯盆地北部，平面上较平缓无较大的起伏，在纵向上构成了下部（本溪组—山西组）、中部（下石盒子组）和上部（上石盒子组—石千峰组）三套成藏组合。

本次研究区的区域地应力方向，主要采取钻井井壁崩落法、成像测井资料和裂缝监测资料。临兴区块通过电成像测井资料统计，共计 16 口井 43 层 266 个崩落点。通过对单井资料中井壁崩落的识别与分析，研究区区域最大主应力方向主要以近 EW 为主。

水力压裂法测量现今地应力主要应用微地震裂缝

监测资料，判断水力压裂施工中形成人工裂缝方向，其方向即为最大地应力方向。本次研究应用 25 口地面微地震裂缝监测资料，根据裂缝监测切片中显示的人工裂缝的延伸方向，编绘临兴区块分层位最大主应力方向图，研究区区域最大主应力方向主要以近 EW 为主。

2 人工裂缝形态因素分析

人工裂缝是在压裂施工中形成的人造裂缝，通过微地震裂缝监测资料统计（表 1），大致可以划分三种形态：线形条带状、交叉形分支状、多边形复杂状。研究区共计 25 口 52 层，其中线形条带状最多 27 层，交叉形分支状次之 14 层；多边形复杂状达 11 层。综合分析后，认为控制人工裂缝形态的主要因素有：地质因素和压裂工艺因素，其中地质因素包括：地应力、砂体规模、天然裂缝；压裂工艺因素：总液量、段塞、砂比等。

2.1 砂体规模对人工裂缝形态的影响

在对临兴先导实验区 15 口定向井及水平井储层砂体展布、压裂施工曲线及压后裂缝形态资料分析后，认为砂体展布在很大程度上影响压裂裂缝的缝高及缝长。

将太 2 段各井压裂监测显示的裂缝形态按比例投于沉积微相平面图（图 1）中可知：位于砂体最发育的心滩中部的 X-103 井，压后裂缝缝长达 340m，且形成分枝缝，加大了裂缝的表体积。位于河道边部的 X-104 井，其破裂体积仅 244000m³，缝长较小仅 210m，同样位于河道边部的 X-104-7D 井压后裂缝缝

表1 临兴区块人工裂缝形态统计表

井号	层位	压裂井段	厚度	施工参数		裂缝参数			无阻流量 10^4m^3	裂缝形态
				总液量	加砂量	缝长	缝高	破裂表面积		
				m^3	m^3	m	m	10^4m^2		
X-1	大2	2061.4-2064.5	3.1	270.8	25.2	300	45	144	2.85	多变复杂式
	盒2	1599.3-1602.1	5	201.9	24.8	350	50	78	0.11	线条带状
X-4	山1	1657.1-1662.6	5.1	252.94	30.1	440	60	84.6	0	线条带状
	盒2	1300.1-1317.2	17.3	405.6	52.3	330	60	64	0	交叉分支状
X-5	山2	1700-1717	17	371.5	42.1	350	50	50.4	0.11	交叉分支状
	盒8	1611.7-1616.7	5	208.74	25.1	270	60	32.4	0	线条带状
	盒6	1514.8-1519.2	4.4	212.24	26.1	190	60	31.4	1.21	交叉分支状
	盒5	1473.2-1480.1	6.9	299.5	35.6	240	60	42.4	1.83	线条带状
X-6	盒8	1641.8-1651.9	10.1	384.7	55.1	480	60	115.2	0.85	线条带状
	盒4	1466.5-1472.1	5.6	234.2	25.8	320	60	86.4	4.8	线条带状
	千5	1279.2-1288.5	9.3	334.3	34.3	340	60	60.9	0.91	交叉分支状
X-8	盒7	1709.4-1715.5	6.1	272.8	30.1	240	30	64.9	7.58	交叉分支状
	盒6	1674.8-1685.5	10.7	342.3	22.8	230	35	84.2		交叉分支状
	千5	1368.7-1387.8	19.4	624.2	63.4	240	40	124.2	0	交叉分支状
X-9	千5	1326.5-1329.5	10.7	403.2	40	230	30	53.1	0	交叉分支状
		1333.3-1337.3								
		1346.6-1350.3								
X-10	盒7+盒8	1477.5-1502.2	27.7	328.7	30	280	30	70.6	0.48	线条带状

长较小, 破裂体积也较 X-103 井小。

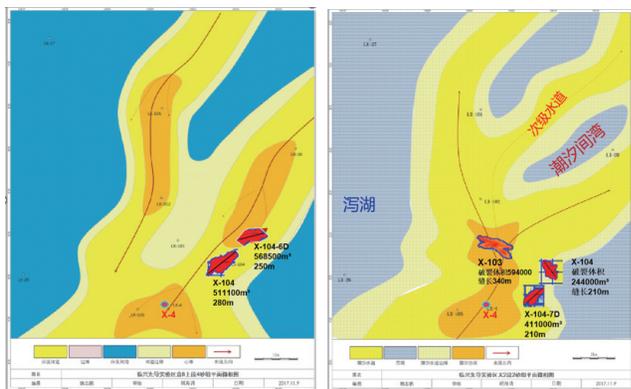


图1 裂缝形态与沉积相叠合图

将盒8上4砂组各井压裂监测显示的裂缝形态按比例投于沉积微相平面图中可知: 位于河道中部的两口井 X-104、X-104-6D, 压后裂缝表体积均较大, 且裂缝展布方向沿河道砂体走向拓展。

由此可初步推断, 裂缝形态与储层砂体展布及所处沉积微相环境相关, 裂缝更易在砂体范围较大的相带(心滩, 河道中部等)进行缝长与缝高的拓展。

2.2 天然裂缝对人工裂缝形态的影响

结合施工曲线和监测的井周边能量变化情况, 评价井周围的天然裂缝发育及非均质性特征, 分析其对压裂裂缝形态及压裂产能的影响。根据地下能量释放

的间歇性特性, 在不同的时间段上, 分析地下微破裂释放能量的分布的线性特征, 即可得出区域天然裂缝的发育情况。

储层岩性和天然断层或裂缝均影响水力裂缝的延伸, 在天然断层或裂缝不发育的区域, 储层岩性对水力裂缝的延伸具有主导控制作用, 由于砂岩具有比泥岩更好的脆性, 水力裂缝的延伸将被限定在砂岩分布区域内; 在天然断层或裂缝发育区储层岩性和天然断层或裂缝均影响水力裂缝的延伸。

2.3 压裂段塞对裂缝形态的影响

在压裂施工过程中, 加入段塞以后会降低孔眼及近井的摩擦阻力, 在此过程中, 通过裂缝监测可以观察到其破裂方向和能量的变化。通过对压裂监测的40多个层破裂过程分析得出, 加入段塞期间会导致破裂方向的改变, 在破裂的后期, 会形成新的分支裂缝。

X-9井在加段塞后, 破裂方向发生改变, 由NE方向, 变为近似EW向, 最终形成了复杂裂缝, 增加了破裂表体积。前期破裂能量较大, 后期减小, 表明造缝容易, 后期主要以剪切缝为主, 最终形成了两条分支缝, 但分支裂缝破裂规模较小。

3 不同层位破裂特征

通过四维影像监测资料, 观察对岩石的破裂过程

中过井的破裂能量变化,可以反映地壳破裂程度的强弱,从而间接反映出储层的破裂特征。总体上,破裂能量越高,表明破裂越剧烈。在正常压裂时,压裂初期岩石出现破裂时其在达到破裂压裂以后,微地震监测的破裂能量较强,当压开地层以后,破裂明显减弱,破裂能量降低。

当裂缝在延伸过程中遇到障碍时,会继续开启新的破裂点,此时破裂能量又增强。通过破裂能量的变化,能反应出裂缝的在地层中断层、天然裂缝、储层非均质性等特征。统计了14口井34个裂缝监测层位的主要破裂特征和破裂能量分布情况,总体上具有如下特征:

石千峰组:整体上破裂能量低,表明储层容易被压开,这些与储层的物性好而且脆性强有关,破裂能量分布均匀形态。

上石盒子组:破裂能量差异大,最高达到1.2,最低为0.05,破裂能量总体表现为先高后低的特征,反应储层破裂点多,形成的裂缝形态复杂。

下石盒子组:破裂能量差异大,最高4.9,最低0.3,破裂能量分布以均匀分布及先高后低为主,表明该层破裂形态复杂。

山西组:破裂能量总体高于上部几个层位,表明造缝难度高于上部层位,地层较难被压开,破裂能量以均匀为主,同时伴有砂堵趋势,表明压裂过程中,没有出现新的破裂点。

太原组:太原组与山西组相同整体上破裂能量较高,主要表现为先高后低的特征,可能由于天然裂缝较发育,导致最终的裂缝形态复杂,压裂效果好。

总体上表现为地层越深监测的破裂能量越高,压裂难度越大,形成的裂缝相态越复杂;相对上部的石千峰组破裂能量低,在初期裂缝的规模即已经形成,后期的破裂能量较弱,裂缝长度为明显增加。

4 压裂工艺优化

薄储层压裂施工优化(砂体厚度小于5m):思路是增加缝长,优化加砂量,预防砂堵。具体工艺优化建议为控制裂缝高度,适当增加施工规模,前置液采用多个支撑剂段塞,打磨主裂缝同时封堵分支缝,保障主裂缝充分延伸,形成长缝。

中厚层压裂施工优化(砂体厚度在5—10m):思路是增加缝长,增加多段塞,造分支缝。具体工艺优化建议探索混合水压裂工艺可行性,同时结合缝内暂堵转向技术,增大施工规模,尽可能形成复杂裂缝、

扩大裂缝表体积。

厚层压裂施工优化(砂体厚度大于10m):思路是增大压裂施工规模,优化人造裂缝在厚层中定位延伸,控制缝高。具体工艺优化建议:①探索混合水压裂工艺可行性,同时结合缝内暂堵转向技术,增大施工规模,尽可能形成复杂裂缝、扩大裂缝表体积;②根据气层位置不同,采用控缝高工艺技术(下沉剂、上浮剂等),尽可能使支撑剂充填在气层中。

5 结论

①研究区现今研究区区域地应力方向与华北地区区域地应力方向基本一致为NEE到近EW;②人工裂缝形态的主控因素:地应力、砂体规模、天然裂缝、压裂工艺参数:段塞、砂比等;③不同层位破裂特征:石千峰组整体上破裂能量低,表明储层容易被压开;上石盒子组储层破裂点多,形成的裂缝形态复杂;下石盒子组破裂能量差异大破裂形态复杂;山西组地层较难被压开,破裂能量以均匀为主,同时伴有砂堵趋势;太原组破裂能量较高,主要表现为先高后低的特征,裂缝形态复杂。

参考文献:

- [1] 陆诗阔,王迪,李玉坤,等.鄂尔多斯盆地大牛地气田致密砂岩储层三岩石力学参数场研究[J].天然气地球科学,2015,26(10):1843-1850.
- [2] 路保平,鲍洪志.岩石力学参数求取方法进展[J].石油钻探技术,2005,33(5):44-47.
- [3] 刘文革.某区域岩石力学参数试验研究[J].中外能源,2012,17(6):35-38.
- [4] 归榕,万永平.基于常规测井数据计算储层岩石力学参数——以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J].地质力学学报,2012,18(4):418-424.
- [5] 李金柱,李双林.岩石力学参数的计算及应用[J].测井技术,2003,27(增刊):15-18.
- [6] 吴文娟,师永民,王小军,等.超低渗油气藏非对称压裂数值模拟理论及应用[J].北京大学学报(自然科学版),2012,48(6):895-901.
- [7] 曹正林,郑红军,苟迎春,等.三维岩石力学参数场随机模拟预测方法及应用[J].现代地质,2009,23(6):1126-1130.

作者简介:

孙泽宁(1989.10-),男,汉族,山东东阿人,职称:工程师,学历:研究生,研究方向:非常规气储层改造方向。