

苏里格气田细分粒径支撑剂导流能力评价及试验

赵勇¹ 李新英² 李达¹

1. 中国石油长庆油田公司苏里格气田研究中心 2. 川庆钻探工程有限公司工程技术研究院

赵勇等. 苏里格气田细分粒径支撑剂导流能力评价及试验. 天然气工业, 2011, 31(8): 65-68.

摘 要 苏里格气田主力气层必须要进行压裂才能获得有效的井口产能, 而获得较高的压裂裂缝导流能力则是其关键所在, 然而国内外现用的支撑剂导流能力评价标准中支撑剂的粒径划分范围较大, 只有针对不同类型气层采用合理粒径支撑剂进行压裂改造, 才能有助于提高改造效果, 进一步提高单井产量。为此, 以苏里格气田现用的多家陶粒支撑剂性能评价为基础, 通过新的支撑剂粒径划分和筛选, 对符合苏里格气田压裂用支撑剂进行室内实验, 开展了不同组合方式下的裂缝导流能力评价, 优化适合该区域不同储层条件的支撑剂及粒径, 并开展现场试验, 取得了较好效果, 为提高储层改造针对性、改善压裂改造效果提供了新的方法。

关键词 裂缝导流能力 支撑剂 粒径 室内评价 现场试验 苏里格气田

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2011.08.015

长庆苏里格气田是一个典型的“三低”气田, 储层不经过压裂就无法获得井口产能。苏里格气田东区主力含气层位以二叠系下石盒子组 8 段、下二叠统山西组 1 段为主, 地层厚度 100~120 m, 主要储集岩有灰色、灰白色细砾岩、含砾粗砂岩、粗砂岩。按照苏里格气田开发方案要求, 气井投入生产后需要稳产 3 年, 对压裂支撑裂缝的导流能力提出了更高的要求。为保证压裂裂缝有较好的长期导流能力, 有必要对目前常用的支撑剂进行细分, 并进行室内支撑裂缝长期导流能力评价, 以有效地指导现行的压裂作业设计, 保证获得压后较稳定的有效支撑裂缝导流能力, 提高气井单井产量和累积采收率, 降低压裂作业成本。

1 导流能力评价的理论基础

1978 年辛科 (Cinco) 提出了一个选择支撑剂判断准则, 即

$$C_r = (KW)_f / KX_f$$

为了保证压裂效果, C_r 值要大于 10。目前常用的无因次裂缝导流能力 (F_{cd}) 对于压裂作业有效的判断标准为:

$$F_{cd} = (KW)_f / KX_f$$

对于垂直裂缝, 当 $F_{cd} > 30$ 时压裂改造才会有效果; 对于水平裂缝, 当 $F_{cd} > 10$ 时压裂改造有效^[1-2]。

一般室内评价影响裂缝导流能力的主要因素包括^[3-5]: ①原始地应力与地层孔隙压力; ②支撑剂物理性能; ③支撑剂缝内铺设浓度; ④支撑剂物理性能与原始地层岩石物性参数的适配度; ⑤压裂液对裂缝导流能力的伤害; ⑥裂缝闭合后地应力作用时间及油气田开采状态下原始地应力变化对裂缝导流能力的影响。

因素①、⑥和因素④中的原始地层物性参数是先天性不可改变的。因素②、③、④、⑤等可以事先在设计时加以改进^[6]。为了进一步提高有效支撑条件下裂缝的导流能力, 有必要对因素②、③进行相应的室内评价并进行改进, 确保压裂改造效果。因素⑤评价的主要是压裂液体体系性能, 笔者暂不涉及。

对 20/40 目压裂支撑剂再进行不同粒径细分, 同时进行相关条件下的室内物理性能评价, 评价其裂缝导流能力变化是很重要的。将现用 20/40 目的支撑剂 (陶粒、石英砂) 按照新的物理分类进行不同方式的组合, 结合苏里格气田压裂所获得的地层原始裂缝闭合应力, 通过室内评价, 优化支撑裂缝导流能力, 可提高气井单井产量。

2 研究方案及评价

2.1 室内实验评价标准

长庆气区苏里格气田压裂用支撑剂的粒径规格主要为 20/40 目。室内评价时先将现用各厂家的压裂陶粒按照评价标准进行规定粒径组合下的性能评价,实验评价模拟闭合应力采用 52 MPa 和 69 MPa^[7]。选

取评价合格的陶粒,进行不同分类组合,室内评价组合充填层裂缝的导流能力。

2.2 支撑剂性能评价

依据行业标准 SY/T 5108—2006《压裂支撑剂性能指标及测试推荐方法》相关规定,对现场抽取的 9 家(种)支撑剂样品进行了分类性能评价,结果见表 1。

评价结果显示,目前在用的 15 种中密度陶粒基本

表 1 支撑剂性能评价结果表

类别	生产厂家及标准	体积密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	视密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	浊度/ FTU	圆度	球度	破碎率		粒径符合率			
							52 MPa	69 MPa	$\geq 180 \mu\text{m}$	850~425 μm	500~42 μm	$< 425 \mu\text{m}$
中 密 度 陶 粒	A	1.76	3.13	93.2	0.90	0.90	1.86%	8.57%	0	98.1%	0	0
	B	1.69	3.03	85.1	0.89	0.90	7.42%	16.18%	0	92.2%	0	0
	C	1.74	3.23	87.4	0.90	0.90	3.39%	13.20%	0	99.7%	0.4%	0.1%
	F	1.75	3.13	76.0	0.90	0.90	4.74%	14.17%	0	96.6%	0.9%	0.1%
	G	1.80	3.23	79.5	0.90	0.90	2.71%	9.51%	0	99.0%	1.2%	0.4%
	H	1.75	3.23	81.6	0.90	0.90	4.11%	10.26%	0	97.5%	1.0%	0.2%
	I	1.65	3.23	88.2	0.89	0.90	5.49%	13.80%	0	99.4%	0.6%	0.1%
	J	1.74	3.16	81.9	0.90	0.90	2.62%	12.67%	0	99.8%	0.9%	0
	K	1.71	3.22	83.7	0.90	0.89	3.83%	9.13%	0	97.7%	3.4%	0.8%
	标准要求	/	/	≤ 100	≥ 0.80	≥ 0.80	$\leq 5.0\%$	/	$\leq 0.1\%$	$\geq 90\%$	$\leq 10\%$	$\leq 2\%$

能够满足苏里格气田尤其是东区储层的压裂要求(裂缝闭合压力小于 52 MPa)。对于中区气井裂缝闭合应力大于 52 MPa 时,部分厂家的陶粒破碎率增大,可能无法获得设计的裂缝导流能力,在破碎率指标评价上以 B 厂的中密度陶粒最高,达 7.42% (52 MPa) 和 16.18% (69 MPa); A 厂的陶粒破碎率最低(分别为 1.86% 和 8.57%)。故评价裂缝导流能力时采用了 A 厂产品进行不同组合。

2.3 支撑剂充填层裂缝导流能力评价

2.3.1 短期导流能力评价

支撑剂短期导流能力评价主要依据行业标准 SY/T 6302—1997《压裂支撑剂充填层短期导流能力评价推荐方法》。对比评价不同粒径陶粒和复合支撑剂的短期导流能力,在设计上优化苏里格气田支撑剂粒径选择及降低施工成本,室内选取性能较为稳定的常用的中密度陶粒进行短期导流能力实验。从图 1 可以看出,支撑剂粒径越大,短期导流能力越好。复合组合支撑剂,大粒径所占比例越高,短期导流能力越好^[5]。通过图 1 还可以看出,10/20 目和 20/40 目的组合支撑剂陶粒,其导流能力明显高于 20/30 目、20/40 目等单一陶粒的导流能力。对于 10/20 目和 20/40 目的组合支撑剂陶粒,随着 10/20 目陶粒所占比例的下降,导流能力下降;在下降幅度方面,10/20 目与 20/40 目陶粒所占

比例为 1:1 与 2:1 的导流能力差异较小,尤其是在闭合压力大于 45 MPa 后,二者的导流能力接近。

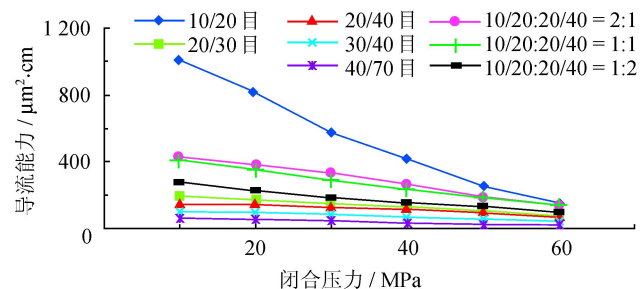


图 1 不同支撑剂短期导流能力实验结果图

2.3.2 长期充填裂缝的导流能力评价

室内取闭合压力 52 MPa,以蒸馏水为驱替介质,按照 10.0 kg/m² 浓度铺设支撑剂,室温下评价了几种不同规格陶粒和复合组合支撑剂的长时间导流能力。实验结果如图 2 所示。

20/40 目陶粒与 20/40 目石英砂按 2:1(体积比)混合后,在 52 MPa 下导流能力较低,主要是石英砂抗压强度不够,在 52 MPa 下破碎率过高造成。

30/40 目、20/40 目和 20/30 目 3 种不同规格陶粒 72 h 后导流能力分别为 73.16 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 、102.5 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 和 118.3 $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$,粒径较大,导流能力较好。

可以看出,随着时间的推移,粒径增大,导流能力下降速度较快,但其末期导流能力仍高于较小粒径支撑剂。

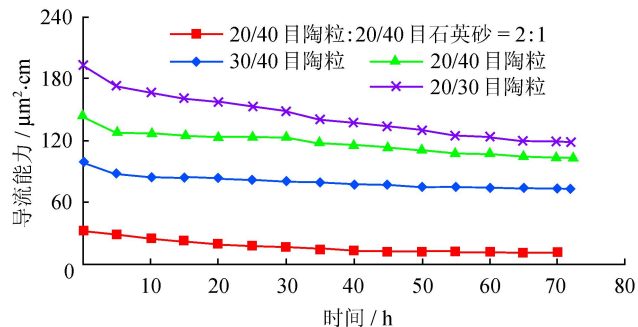


图2 不同支撑剂长期导流能力图

在单规格陶粒组合上,长期导流能力的评价结果表明闭合应力为52 MPa下,20/30目陶粒从开始到后期都能够保持较高且较稳定的裂缝导流能力。

3 现场试验应用

为了评价粒径细分后20/30目支撑剂对苏里格气田东区储层的适应性,2010年分别在苏东X、苏东Y井进行了现场压裂试验,2口井试气结果证明,使用20/30目支撑剂取得了很好的改造效果。

3.1 苏里格气田东区闭合应力情况

苏里格气田中东区主力气层为盒8段和山1段。中区41口井54次压裂资料统计分析解释结果得出,盒8段平均裂缝闭合应力为46.8 MPa,30口井39次压裂资料处理结果得出压裂后山1段平均裂缝闭合应力为52.8 MPa。东区64口井81次压裂资料的统计分析结果得出该区盒8段平均裂缝闭合应力为45~47.8 MPa,52口井66次压裂资料处理结果得出该区山1段压后平均裂缝闭合压力为48.6~50.1 MPa。储层岩石杨氏弹性模量一般介于 $2 \times 10^4 \sim 3.6 \times 10^4$ MPa,泊松比为0.26~0.28,储层压力系数为0.86 MPa/100 m左右。

3.2 试验井地质情况

根据苏东储层地质状况选择2口试验井X、Y。根据测井解释结果,苏东X井为苏里格气田东区典型的II类井,共钻遇山1、山2段气层、含气层3段,其中山1¹气层有效厚度为4.0 m,山1²含气层有效厚度为2.0 m,山2段气层有效厚度为2.9 m;苏东Y井为苏里格气田东区典型的I类井,共钻遇盒8、山1段气层、含气层5段,其中盒8_F¹气层的2段气层有效厚度分别为3.5 m和5.1 m,盒8_F²气层有效厚度为6.4 m,山1²含气层有效厚度4.4 m。

3.3 试验井设计及施工情况

苏东X井储层压裂裂缝闭合应力在48.0 MPa左右,可以选用20/30目陶粒。根据该井山1²气层上下隔层应力遮挡好、砂体较厚,因此设计排量应适当高些,以满足对储层进行有效改造,设计裂缝导流能力为 $33.6 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$;山1¹气层上下隔层应力遮挡好,但砂体较厚达到5.0 m,因此设计砂量和砂比综合考虑满足储层物性对导流能力的需求即可,设计裂缝导流能力为 $23.7 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$;山2段有效气层厚度只有2.9 m,但砂体厚度较大,达28.5 m,加大施工规模以增强对储层砂体的改造程度,设计裂缝导流能力为 $27.1 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。

苏东Y井储层压裂裂缝闭合应力预计在50.0 MPa左右,选用20/30目陶粒。该井盒8_F¹层上下隔层应力遮挡好,砂体较厚并有小隔层,因此设计排量应适当加大,以满足对储层两个段都进行有效改造,设计裂缝导流能力为 $25 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$;盒8_F²层上下隔层应力遮挡好,且砂体较厚有12.2 m,因此设计砂量和砂比综合考虑满足储层物性对导流能力的需求就可,设计裂缝导流能力为 $28 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$;山1段有效气层厚度为12.5 m,砂体厚度相对较大,适当加大施工规模以增强气层段裂缝的有效支撑,设计裂缝导流能力为 $35 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$ 。

2口试验井主要设计及施工参数见表2。

3.4 试验井试气排液情况

苏东X、苏东Y井排液顺利,全部实现一次排通,返排率在80%以上,苏东X井压裂后试气无阻流量为 $4.1705 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,苏东Y井试气无阻流量为 $51.6361 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,效果非常明显,相比地质条件接近的邻井,试气产量提高20%~30%,20/30目陶粒在2口试验井中取得了非常好的应用效果。

4 认识与结论

1)采用10/20目和20/40目复合型陶粒支撑剂能够达到较大程度增加导流能力的目的,根据不同比例下的导流能力增加幅度,建议10/20目陶粒体积比例至少选择50%。

2)在苏里格东区盒8段采用20/30目的陶粒作为压裂用支撑剂,可以获得较高的裂缝导流能力,2口试验井均获得了较高的工业气流。建议对于闭合压力低于52 MPa的苏东地区储层,可以进一步试验推广20/30目陶粒。

3)室内评价结果显示A厂家的20/30目陶粒性能评价结果最好(破碎率最低)。

表 2 苏东 X、苏东 Y 井设计及施工参数表

参 数	苏东 X 井			苏东 Y 井		
	山 2 段	山 1 ¹ 层	山 1 ² 层	山 1 段	盒 8 _F ² 层	盒 8 _F ¹ 层
射孔段/m	2 903~2 905	2 867~2 869	2 849~2 851	3 108~3 112	3 073~3 076	3 045~3 056
施工排量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	2.5	2.7	3.0	2.8	2.5	3.0
设计加砂量/ m^3	22.0	20.0	25.0	28.0	22.0	24.0
实际加砂量/ m^3	22.6	20.5	25.6	26.2	23.6	22.1
破裂压力/MPa	36.2	69.6	38.7	33.4	27.9	38.7
施工压力/MPa	40.5	44.6	48.5	30.3	40.0	39.5
模拟的裂缝导流能力值/ $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$	27.1	23.7	33.6	35.0	28.0	25.0

4)在 52 MPa 的闭合应力下,石英砂+陶粒组合型支撑剂形成较低裂缝导流能力,其在苏里格地区的压裂适应性需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 万仁溥.采油工程手册[M].北京:石油工业出版社,2003.
 [2] 王德胜.现代油藏压裂酸化开采新技术实用手册[M].北京:石油工业出版社,2006.
 [3] 吉得利 J L.水力压裂技术新发展[M].蒋闾,译.北京:石油工业出版社,1995.
 [4] 温庆志,张士诚,王雷,等.支撑剂嵌入对长期导流能力的

影响研究[J].天然气工业,2005,25(5):65-68.

- [5] 王雷,张士诚,张文宗,等.复合压裂不同粒径支撑剂组合长期导流能力实验研究[J].天然气工业,2005,25(9):64-66.
 [6] 丁云宏,胥云,翁定为,等.低渗透油气田压裂优化设计新方法[J].天然气工业,2009,29(9):78-80.
 [7] 吴奇.井下作业工程师手册[M].北京:石油工业出版社,2002.

(修改回稿日期 2011-06-03 编辑 韩晓渝)