

文章编号:1000-0747(2004)04-0136-03

压裂裂缝伤害室内模拟及裂缝清洗酸化工艺的应用

陈红军,郭建春,赵金洲

(西南石油学院石油工程学院)

摘要:江汉盆地松滋油田鄂深 10 井在钻井、完井过程中,地层受到钻井液污染严重,在压裂施工中因大量前置液滞留地层造成裂缝伤害。根据该井情况建立实验室评价水力压裂裂缝伤害的方法,设计出模拟裂缝伤害过程的环流实验流程和实验方法,开展了室内岩心污染及解堵实验研究,研制出能有效分解瓜胶残渣、解除水力裂缝堵塞的配套酸液体系(以裂缝清洗剂为前置液,较高浓度盐酸为主体酸液),并优化设计出集裂缝清洗与基质酸化解堵于一体的施工工艺,清洗裂缝和改善近缝地层渗透性同步进行。鄂深 10 井实施该清洗酸化工艺后产能提高较大,4month 累计产油 575.6t。图 4 表 2 参 5

关键词:水力压裂裂缝伤害;储集层基质伤害;环流模拟实验;清洗酸;裂缝清洗;清洗酸化工艺

中图分类号:TE258.2; TE258.3

文献标识码:A

1 鄂深 10 井概况

鄂深 10 井为江汉盆地松滋油田复兴场 I 号断块的评价井,完钻井深为 3602.0m。复兴场 I 号断块主力油层分布在渔洋组,储集岩以石英砂岩为主,油层中部压力为 36.25MPa,温度 115℃,地层压力系数为 1.12。2002 年 5 月对渔洋组主力油层进行了地层测试,测试结果显示,储集层有效渗透率为 0.053mD,平均孔隙度约为 8%,含油饱和度平均为 53%。由于取心时漏失钻井液 20m³,储集层基质受到伤害,计算表皮系数为 14.13,油流阻力大。2002 年 7 月,鄂深 10 井实施加砂压裂改造,工作液为羟丙基瓜胶体系。由于施工过程中发生机械故障停止施工 7h,导致大量前置液滞留地层,裂缝闭合后,压裂液残渣停留在裂缝中形成残渣泥饼,造成裂缝伤害,使裂缝导流能力降低。由于该井压后产能低,实施清洗酸化施工前处于关一段时间、生产一段时间的“间歇式”生产状态,生产时产量为 2m³/d。

分析地质、录井、测井、压裂设计和施工报告等资料,认为鄂深 10 井产能低主要是由于钻井液对储集层基质的伤害和瓜胶残渣对水力裂缝的伤害两方面的原因,后者影响更大。

2 鄂深 10 井水力压裂裂缝伤害模拟

2.1 水力压裂裂缝伤害环流模拟实验

环流装置是一种多功能模拟器(见图 1),与酸液导流能力装置 FATSC^[1]有相似功能。在环流装置上模拟压裂施工的压力、排量、砂比、破胶剂浓度梯度等,可准确评价瓜胶残渣对水力压裂裂缝导流能力的伤害程度。环流实验的步骤是:①将全直径

岩心制成板状长方体岩样,中间夹上粒径为 4.2~8.3mm 的压裂砂(铺砂浓度 7.722 kg/m²),固定在导流室中;②在设定的 90℃ 实验温度下,用清水测出填砂裂缝在地层的静闭合压力(45MPa)下的裂缝导流能力;③将配好的瓜胶(用量 95L)置于罐中,用泵打入循环回路中,按实际施工时的流速和剪切速率(油管剪切速率 1780~1890 s⁻¹,炮眼剪切速率 3980~4002 s⁻¹)使瓜胶在管路中循环,剪切时间取施工时瓜胶由井口至地层所经历的时间(76min),循环过程中,加入破胶剂过硫酸铵,加入量和浓度梯度根据施工设计加量确定;④管路中的瓜胶在定剪切速率下剪切设定的时间后,流经导流室,经过填砂裂缝,至所有瓜胶过完为止。最后,用清水测出静闭合压力下填砂裂缝的导流能力和渗透率。

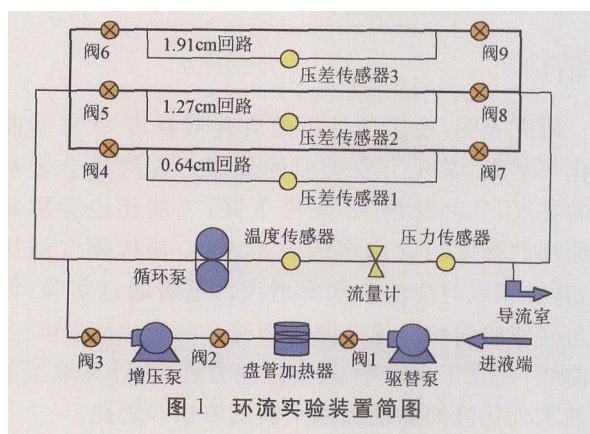


图 2 为不同闭合压力下填砂裂缝导流能力实验结果,可见裂缝导流能力随施加于垂直裂缝壁方向的闭合压力的增加而降低,在达到陶粒破碎压力之前,近似呈线性递减关系,达到实际地层裂缝静闭合压力(45MPa)左右时,裂缝导流能力为 6.83D·cm。

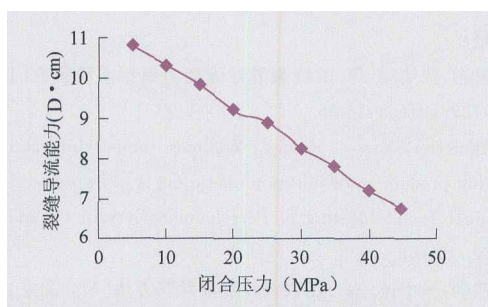


图2 不同闭合压力下填砂裂缝导流能力

图3 粉红色曲线为过完瓜胶后填砂裂缝导流能力实验结果,可见在不同闭合压力下,过完瓜胶后裂缝导流能力较初始裂缝导流能力有不同程度的下降,随着裂缝闭合压力的上升,裂缝导流能力下降幅度显著增大,达到静闭合压力 45MPa 时,裂缝导流能力为 3.12D·cm,瓜胶残渣使填砂裂缝导流能力损失 54.5%。

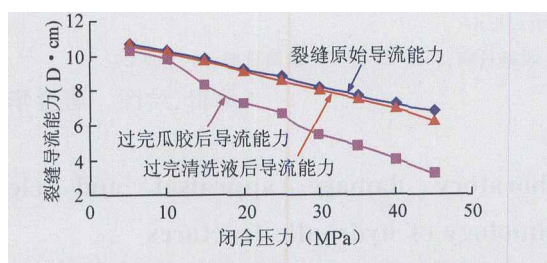


图3 裂缝清洗前后填砂裂缝水测导流能力对比图

2.2 储集层基质伤害模拟实验

通过岩心流动实验模拟了钻井液对岩心的污染情况。实验温度(90℃)参考鄂深 10 井压前压裂液流变实验的相关数据和不稳定换热模型^[2,3]温度剖面模拟计算结果确定;压力是根据实际钻井过程中,钻井液柱的压力超过地层压力(油层深度为 3361m,地层压力为 36.25MPa,钻井液密度为 1.15~1.20g/cm³)导致钻井液侵入而造成地层伤害的界限而定(岩心流动实验注入压力设定为钻井液柱的压力与地层压力之差,为 2.8 MPa);污染时间(120min)根据钻井过程中打开产层时产层厚度和钻头钻进速度确定。

岩心流动实验的步骤:①先用地层水测得岩心初始渗透率(K_0);②用配制的钻井液在设定压力下驱替 120min,再用地层水反向测得岩心污染后渗透率(K_1),得出岩心渗透率伤害比 F_d ($F_d = (K_0 - K_1)/K_0$)。驱替试验结果(见表 1)显示,经过钻井液驱替后各岩心渗透率降低幅度在 80% 以上,证明鄂深 10 井近井地层在钻井过程中产生了严重的钻井液堵塞。

表 1 鄂深 10 井岩心钻井液驱替试验结果

岩心编号	K_0 (mD)	K_1 (mD)	F_d
A	0.114	0.0167	0.853
E	0.490	0.0744	0.848

3 裂缝清洗酸化工艺优化设计与应用

3.1 配套酸液体系

用于清除地层与压裂裂缝伤害的酸液必须能恢复水力压裂裂缝导流能力和提高地层供液能力。由于地层钙质含量高,主体酸采用较高浓度盐酸而不采用土酸,避免产生二次沉淀^[4]。

①酸液体系。根据鄂深 10 井潜在伤害因素分析,采用裂缝清洗剂为前置液,较高浓度盐酸为主体酸液。

裂缝清洗液:

a 液:1.0%过硫酸铵溶液+2.0%粘稳剂 BA1-13

b 液:5.0%清洗剂 BA1-4+甲醇

解堵酸液:

15% HCl+1.5%缓蚀剂 SW-18+1.0%铁离子稳定剂 BA1-2+2.0%清洗剂 BA1-4+1.0%助排剂 BD1-5

顶替液:

2.0%粘稳剂 BA1-13+0.5%清洗剂 BA1-4

②解堵酸液主要性能指标。外观为红褐色均匀透明液体,无分层、无析浮。对鄂深 10 井岩样溶蚀率为 36.4%,对 N80 钢片静态腐蚀速率为 0.87 g/(m²·h),残液表面张力 22.1mN/m。

③解堵酸液解堵效果评价实验。酸液体系效果评价岩心流动实验是对实际酸化施工的室内模拟,可论证酸液体系对储集层的适应性,分析酸化效果。

④酸液岩心流动实验步骤及结果分析。用酸驱替污染后的岩心,酸液挤入方向与钻井液侵入方向保持一致,最后用地层反向测得过酸后的渗透率 K_2 ,观察酸化解堵后岩心渗透率增加的倍数 K_2/K_1 。实验结果(见图 4)显示,过酸后,各岩心渗透率都大幅度提高,经过 50PV 左右酸液的溶蚀作用,岩心渗透率得到很大改善,不仅能有效解除钻井液造成的堵塞,还能有效改善储集层基质渗透率。

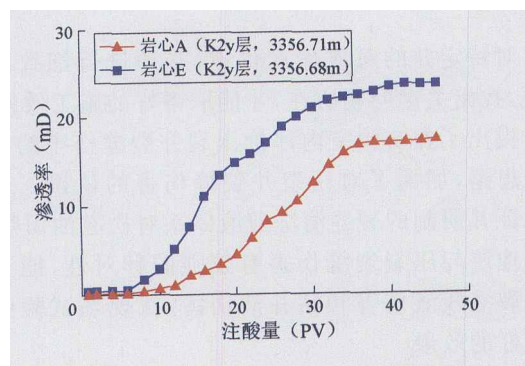


图4 鄂深 10 井岩心酸化前后渗透率变化曲线

⑤裂缝清洗液效果评价实验。在环流装置上,过完瓜胶后,用设计量裂缝清洗液通过导流室,观察清洗

液对瓜胶残渣的处理效果。结果(图3中红色曲线)表明,用清洗液处理后,大部分瓜胶残渣已被氧化剂分解成可溶物质。在地层静闭合压力下,裂缝导流能力提高到 $6.22\text{D}\cdot\text{cm}$,裂缝导流能力恢复率达到91%。

3.2 工艺优化设计

裂缝清洗和酸化工艺设计以解除压裂裂缝中和裂缝壁面的伤害为原则,在避免重新撑开地层中水力裂缝的前提下,尽量提高施工排量,以达到深部疏通裂缝和提高酸液有效作用距离的目的。由鄂深10井压裂施工数据,井底破裂压力梯度为 $0.016\sim0.017\text{MPa/m}$,清洗酸化施工排量设计为 $1.0\sim2.0\text{m}^3/\text{min}$,预计井口施工压力为 $22.1\sim54.8\text{MPa}$ 。利用“两酸三矿物”酸化模拟软件模拟计算^[5]和酸液流岩心流动实验结果,鄂深10井单井优化设计结果见表2。

表2 鄂深10井单井裂缝清洗和酸化工艺优化设计结果表

产层 厚度 (m)	清洗液 用量 (m^3)	用酸 强度 (m^3/m)	主体酸 用量 (m^3)	施工 排量 (m^3/min)	施工 压力 (MPa)	增产 倍比
18.0	a液40 b液10	1.0~2.0	30.0	0.6~1.8	22.0~55.0	1.8~2.03

3.3 现场试验与效果

①清洗酸化现场试验简介。2003年3月14日对鄂深10井实施了清洗酸化。施工过程中由于封隔器的原因,套压上升较快,最后在较低的注入压力、排量下将清洗酸液挤入地层,施工压力 $30\sim40\text{MPa}$,排量 $0.6\sim0.8\text{m}^3/\text{min}$,未达到设计的排量和泵压。

②实施清洗酸化后效果。2003年3月14日至3月25日,鄂深10井累计排液 146.81m^3 ,油 69.81m^3 ,残酸返排累计 77m^3 ,残酸返排率85.6%。截至2003年8月1日,本井一直连续稳定生产,产量 $5.5\sim6.5\text{m}^3/\text{d}$,实施清洗酸化后4month累计产油575.6t。

4 结论

对特定井的每次增产作业,必须进行细致深入的论证,找出关键问题所在,才能取得好的施工效果。

提出了在实验室内评价压裂井裂缝伤害的实验方法与思路,加深了对压裂井裂缝伤害的认识。通过实验论证并研制的裂缝清洗酸液体系对松滋油田鄂深10井的地层与压裂裂缝伤害有较强的针对性,能有效解除压裂液残渣伤害和钻井液伤害,在现场试验中取得了较好的效果。

参考文献:

- [1] 蒋卫东,汪绪刚,等.酸蚀裂缝导流能力模拟实验研究[J].钻采工艺,1998,21(6):33-36.
- [2] Eickmerier, Ersoy, Ramey. Wellbore temperature and hot losses during production or injection operation[A]. Presented at the 21st Annual Tech. Meeting of Petroleum Society of CIM, Calgary, May, 1970.
- [3] 王鸿勋,张士诚.水力压裂设计数值计算方法[M].北京:石油工业出版社,1998.
- [4] 米卡尔J,埃克诺米得斯.油藏增产措施[M].张保平,等(译).北京:石油工业出版社,2002.
- [5] 李勇明,郭建春,等.酸液三维流动反应数值计算模型研究[J].西南石油学院学报,2001,23(5):42-45.

第一作者简介:陈红军(1974-),男,土家族,重庆酉阳人,西南石油学院博士研究生,从事油气增产技术研究。地址:四川省成都市新都区,西南石油学院研究生院博士2001级,邮政编码:610500。E-mail:Oliver_chj@yeah.net。

收稿日期:2003-05-28

修回日期:2004-03-26

(编辑、绘图 唐金华)

Laboratory damage appraisal and cleaning technology of hydraulic fractures

CHEN Hong-jun, GUO Jian-chun, ZHAO Jin-zhou
(Southwest Petroleum Institute, Sichuan 610500, China)

Abstract: A kind of fracture cleaning acid is designed for ES-10 well in the Songzi Oilfield to remove both the fracture damage caused by residue of fracturing pad and formation damage due to drilling mud. A special loop experimental procedure is presented for modeling the flowing process of fracturing liquid from ground to fracture and the fracture damage due to uncompleted decomposition of fracturing pad or residue of fracturing fluid. The loop experiment suggests that the fracture cleaning acid is not only quite effective in decomposing residue gel, but can eliminate the damage caused by drilling mud. In order to increase the acid penetration distance and decompose the gel residue, high concentration of the fracture cleaning acid and high injection rate are applied in the treatment. The fracture damage is removed and the permeability of the formation near the fracture is improved, and the production of the well could be greatly improved.

Key words: fracture damage; reservoir matrix damage; reservoir loop experiment; cleaning acid; fracture cleaning; acidizing-cleaning technology