

酸处理降低储层破裂压力机理及现场应用

曾凡辉¹, 刘林¹, 郭建春², 林立世¹, 王兴文¹

(1. 中国石化西南油气分公司 工程技术研究院, 四川 德阳 618000;

2. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室 西南石油大学, 四川 成都 610500)

摘要: 压裂改造是提高低渗透油气藏采收率的重要手段, 而地层破裂是储层压裂改造的关键。在低渗透储层的改造过程中, 由于储层段埋藏深、构造应力异常、泥质含量高、钻完井过程中地层伤害严重等原因, 某些井层破裂压力异常高, 导致了施工失败。以砂岩岩样为研究对象, 通过对标准、泥浆污染及酸处理前后岩样的微观、物理性质和力学性质的测试实验, 分析了酸处理降低储层破裂压力的机理。该项技术在川西须家河致密气藏的改造中得到了成功应用, 保证了储层改造的顺利实施, 充分证明了酸处理降低储层破裂压力的可行性。

关键词: 低渗透; 压裂改造; 异常高破裂压力; 酸处理; 现场应用

中图分类号: TE357.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2010)01-0108-03

截至2004年, 中国低渗透油藏的探明石油地质储量为 53.2×10^8 t, 低渗透气藏储量为 $1.2 \times 10^{12} \sim 1.5 \times 10^{12}$ m³, 压裂、压裂酸化改造是这类储层投产的关键技术^[1-4]。在该类储层的改造过程中, 某些井层由于破裂压力异常高, 导致地层压不开、液体注不进, 使得后续增产工作无法进一步开展^[5-8]。地应力异常、储层泥质含量高以及储层伤害严重等是造成异常破裂压力的成因^[9-10]。目前, 喷砂射孔、高能气体压裂、优化射孔、加重压裂液和酸处理技术是降低破裂压力的主要措施^[11-14]。其中, 酸处理技术具有不需要增加额外施工设备、现场操作方便的特点, 具有广阔的发展前景^[15]。为此, 笔者以砂岩储层为研究对象, 对酸处理降低砂岩储层破裂压力的机理开展了深入研究, 揭示了酸处理降低储层破裂压力的机理, 该项技术在DY1井降低破裂压力的施工中得到了成功应用。

1 实验条件和方法

岩样矿物成分的鉴定 通过矿物成分分析, 确定了实验用岩样为细粒斜长石砂岩。岩石碎屑物含量为84.4%~85.4%, 其主要成分为石英、钾长石、斜长石和方解石; 填隙物含量为14.6%~15.6%, 其成分主要为高岭石、绿泥石、伊利石和伊蒙混层。

岩样标定 为了保证实验结果的重复性和对比

性, 对岩样进行了声波波速、密度、孔隙度和岩心渗透率测试。被选用岩样的声波速度为2 800~3 100 m/s, 密度为2.16~2.24 g/cm³, 孔隙度为18.1%~18.7%, 渗透率为 $18.2 \times 10^{-3} \sim 18.4 \times 10^{-3}$ μm²。

实验方法 利用岩心流动、电镜扫描、三轴力学和粒度分析等实验手段, 模拟泥浆污染、酸处理对储层岩石的微观、力学参数的变化情况。

2 实验结果分析

2.1 泥浆污染、酸处理前后岩样的电镜扫描结果

由电镜扫描结果可见: 标准岩样岩石致密, 岩石骨架轮廓明显, 原生粒间孔大部分被伊利石、高岭石或自生石英充填; 基质表面被粘土矿物充填, 伊利石较多, 观察不到孔隙(图1a); 岩样经过泥浆污染后,

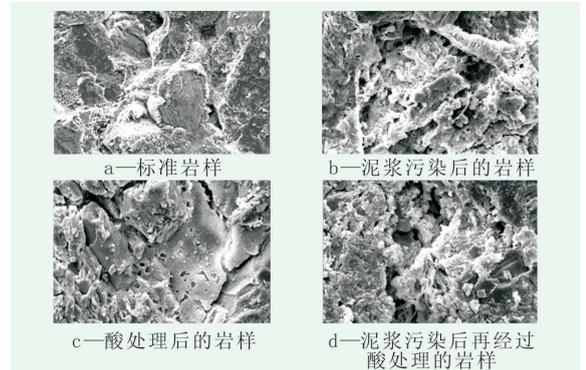


图1 泥浆污染和酸处理前后岩样的电镜扫描结果

颗粒表面变得模糊(图 1b),这是泥浆浸泡使粘土矿物发生软化所致;经酸处理后,岩样产生了溶蚀小孔,岩石骨架颗粒间产生了微裂缝,骨架变得分散(图 1c);而泥浆污染后再经过酸处理的岩样,岩石的骨架变得更加分散,已经观察不到明显的轮廓(图 1d)。

岩样经过 5% HCl—1% HF 的土酸处理,前后不同孔隙占总孔隙的比例分布结果表明(图 2),酸处理前,孔隙直径小于 0.20mm 占绝大多数,最大孔隙直径也不到 0.23mm;酸处理后,孔隙结构得到了明显改善,大孔隙所占的比例增加。

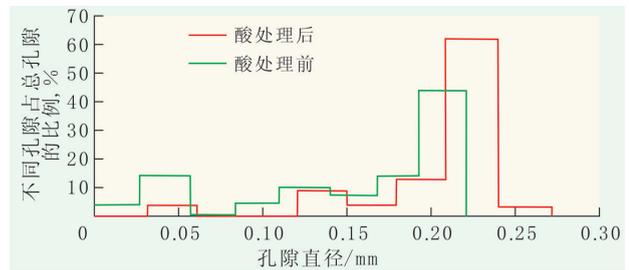


图 2 酸处理前后岩样不同孔隙占总孔隙的比例

2.2 酸处理前后岩样的矿物成分含量和粒度

由岩样经过酸处理前后的矿物成分含量和粒度变化情况可见(表 1),酸处理后,大颗粒成分含量降

表 1 酸处理前后岩样的主要矿物成分含量和粒度变化

实验条件	石 英		钾 长 石		斜 长 石		方 解 石	
	含量, %	粒度/mm	含量, %	粒度/mm	含量, %	粒度/mm	含量, %	粒度/mm
酸处理前	37.52	1.00~0.70	7.70	0.5~0.2	32.68	0.5~0.25	5.50	0.1~0.01
5% HCl	36.40	1.00~0.70	7.50	0.5~0.2	31.45	0.5~0.25	0.15	
5% HCl—0.5% HF	34.80	0.85~0.70	5.20	0.3~0.15	28.53	0.3~0.1	0.20	
5% HCl—1% HF	32.25	0.70~0.50	3.35	0.2~0.1	25.29	0.2~0.1		
5% HCl—3% HF	31.03	0.60~0.50	2.15	0.15~0.1	21.37	0.15~0.1		

低,小颗粒成分含量增加。这是粒径较大、硬度较大的石英、钾长石和斜长石等物质被溶解所致。

2.3 泥浆污染和酸处理前后岩石的力学参数变化

不同实验条件下的岩石力学参数结果表明,经泥浆污染后,岩石的泊松比增加,而抗压强度、杨氏模量和内摩擦角等降低(表 2)。这是由于泥浆与地层水的矿化度、pH 值等不同,岩石的存在环境发生了改变,粘土矿物吸水变软,岩石的含水量增加,水分子在岩石颗粒表面形成了润滑剂;随着薄膜水变厚,岩石颗粒间的电分子力减弱,岩石颗粒之间的摩擦力、团聚体间的咬合力变小造成的。岩石经酸液处理后,酸与岩样中的骨架、胶结物等可溶矿物发生反应,矿物结构受到破坏、改变,导致岩石孔隙度和含水量增大,岩石抵抗变形能力降低,致使岩石的抗压强度和泊松比等均有不同程度的降低。

表 2 不同实验条件下岩石的力学参数

实验条件	抗压强度/MPa	杨氏模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	抗张强度/MPa
酸处理前	54.9	7 058.0	0.421	24	4.5	3.0
泥浆污染 5d	47.3	6 271.7	0.447	22	3.8	2.8
5% HCl 处理	42.0	5 585.2	0.413	20	3.4	2.2
泥浆污染 5d 后经 5% HCl 处理	34.6	3 709.5	0.334	12	1.7	1.6

标准岩样的轴向应力与应变曲线呈典型的脆性变形特征,以弹性变形为主,无初始压实阶段,岩石

破坏前的变形量极小,不超过 0.8%,抗压强度达到峰值以后,岩石的承压能力迅速降低;泥浆污染 5d 后的岩样在变形过程中存在明显的压实阶段(OA),反映出岩样经泥浆污染后变软的特点,岩石达到最大抗压强度后,抵抗破坏变形的能力较强(BC),表现出了明显的塑性特征;经 5% HCl—3% HF 的土酸处理后的岩样,由于酸液溶解了部分物质,使得岩石孔隙度增加,在压缩初期存在明显的压实阶段(OD),岩石的抗压强度达到峰值后,承压能力迅速降低;泥浆污染 5d 后再经过 5% HCl—3% HF 酸处理后岩样的强度进一步降低(图 3)。

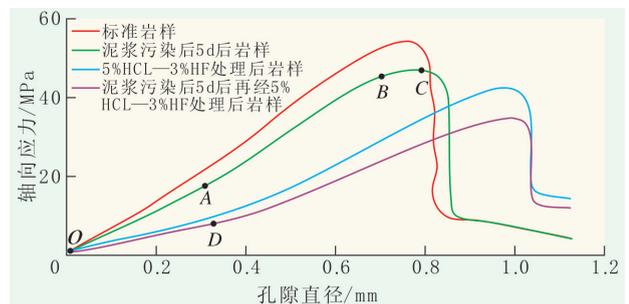


图 3 标准岩样、泥浆污染、酸处理典型的轴向应力与应变曲线

3 酸处理降低储层破裂压力的机理

酸处理能降低破裂压力的原因主要包括 3 点:

①岩样的矿物成分发生变化,导致岩样性质改变。酸处理后岩样中颗粒较大的二氧化硅、方解石、氧化镁等颗粒在酸的作用下被溶解成为更细的颗粒,使岩样的分散程度大大提高,比表面积增大,导致岩样的含水性增强,抗压强度降低。②在酸的作用下,岩样产生离子交换,岩样颗粒的双电层结构发生改变,导致岩样性质改变。在砂岩中对岩样力学性质起重要作用的是颗粒之间的胶结矿物(以高岭石、蒙脱石、钙质、二氧化硅颗粒为主)。在酸处理时,随着粘土胶结物被溶解,溶液中的 Ca^{2+} 和 Fe^{3+} 等离子的质量浓度大大增加,促使了岩样颗粒在表面发生阳离子交换,由溶液中交换能力强的 Ca^{2+} 和 Fe^{3+} 置换出粘土矿物中(尤其是蒙脱石、伊利石)的 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等,离子交换后岩样颗粒表面的双电层电动电位有较大幅度的提高,使岩样颗粒的扩散层变厚,导致岩样矿物颗粒间的静电作用力、化学键作用力降低,大大降低了岩样的力学性质。③改善了岩样的孔隙结构和渗流能力,导致岩样性质的改变。酸液通过与污染泥浆、岩样矿物颗粒、胶结物等发生化学反应,建立了井筒流体与地层的良好通道,使得压开地层更加容易。

4 现场应用

DY1井是在DY构造近轴部署的1口深层预探井,井周围逆断层发育,改造层段为5 106~5 128m。该井的薄片鉴定和电镜扫描结果表明,岩样的碎屑颗粒以石英和岩屑为主,其次为长石;胶结物主要有石英、方解石和白云石。该层段试破施工时,排量为 $1.0\text{m}^3/\text{min}$,泵压从40MPa开始上升,排量提高到 $1.5\text{m}^3/\text{min}$ 时,5min后施工压力上升为80MPa,多次憋压,地层未压开。

针对岩样矿物的组成,在室内实验的基础上,优选了15% HCl作为前置酸、15% HCl—1.5% HF的土酸作为降低储层破裂压力的主体酸。该井于2008年8月20日用酸处理降低破裂压力,当排量为 $1.5\text{m}^3/\text{min}$ 时,施工压力维持在40MPa,酸处理起到了溶解近井堵塞物和岩样矿物的作用。在降低破裂压力的基础上,采取了大型网络裂缝酸化,排量达到 $2\text{m}^3/\text{min}$ 时,地层破裂时施工压力为45MPa,施工后的无阻流量为 $47.336 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,增产效果显著,为DY构造储量评价和产能建设提供了新的技术途径。

5 结论

酸处理作为降低储层破裂压力的有效方式,通过改变岩样的矿物组成和岩样颗粒的双电层结构及改善岩样的孔隙和渗流能力,降低岩石的强度,进而降低了储层的破裂压力。该项技术在DY1井异常高储层破裂压力的改造过程中得到了成功应用,为异常破裂压力储层的储量评价和产能建设提供了新的手段。

参考文献:

- [1] 伊向艺,卢渊,宋毅,等.靖边气田白云岩储层交联压裂技术实践[J].油气地质与采收率,2008,15(6):92-94.
- [2] 蒲春生,郭艳萍,肖曾利,等.新型深穿透酸液体系在西峰油田长8特低渗透储层中的应用[J].油气地质与采收率,2008,15(6):95-97,101.
- [3] 丁云宏.难动用储量开发压裂酸化技术[M].北京:石油工业出版社,2005:1-5.
- [4] 王光付,廖荣凤,李江龙,等.中国石化低渗透油藏开发状况及前景[J].油气地质与采收率,2007,14(3):84-89.
- [5] Yang I, Grosby D G. Investigation of the factors influencing hydraulic fracture initiation in highly stressed formation[J]. SPE 38043,1997.
- [6] 彭建新,张福祥,王永辉,等.异常高压超深井压裂工艺技术研究[C]//2005年国际油气藏增产改造学术研讨会议论文集.北京:石油工业出版社,2006:211-215.
- [7] 黄辉,谭明文,张绍斌,等.川西深层须家河组气藏压裂改造的难点与工艺技术对策[J].钻采工艺,2004,10(5):27-30.
- [8] 曲占庆,齐宁,王在强,等.低渗透油层酸化改造新进展[J].油气地质与采收率,2006,13(6):93-96.
- [9] 万仁溥,罗英俊.采油技术手册(修订本第9分册压裂酸化工艺技术)[M].北京:石油工业出版社,1998.
- [10] 王鸿勋.水力压裂原理[M].北京:石油工业出版社,1987.
- [11] 李根生,牛继磊.水力喷砂射孔机理及实验[J].石油大学学报:自然科学版,2002,26(2):31-34.
- [12] 石崇兵,李传乐.高能气体压裂技术的发展趋势[J].西安石油学院学报:自然科学版,2000,15(5):17-20.
- [13] Morales R H, Brady B H. Three-dimensional analysis and visualization of the wellbore and the fracturing process in inclined wells[J]. SPE 25889,1993.
- [14] 中国石油天然气股份有限公司.一种加重压裂液配方:中国,2005101058138.3[P].2005-09-29.
- [15] 曾庆坤.宝浪油田异常破裂压力预测及降低破裂压力技术研究[D].南充:西南石油学院,2004.