

文章编号: 1001-4888(2007)02-0166-05

转向剂形成人工应力遮挡的实验研究及有限元分析^{*}

俞然刚, 闫相祯

(中国石油大学(华东), 山东东营 257062)

摘要: 针对水力压裂过程中采用的人工应力遮挡控制缝高技术, 通过室内物理模拟实验, 在转向剂浓度一定的条件下考虑携带液与地层压差、渗流量、时间等因素, 采用电测法对人工岩芯表面应变进行了测试; 利用非线性有限元方法对裂缝尖端应力进行计算, 研究了转向剂形成人工应力遮挡的作用效果。结果表明采用转向剂可以建立 3~4MPa 的人工应力遮挡, 对采用转向剂的压裂设计和施工参数提出了建议。

关键词: 水力压裂; 人工应力遮挡; 缝高控制; 实验研究; 有限元分析

中图分类号: TE357.1 **文献标识码:** A

0 前言

自从人们认识水力裂缝三维延伸以来, 各国学者开展了大量的研究工作, 推动了缝高控制技术的发展, 其中采用转向剂控制裂缝高度已在现场实施^[1,2], 取得了显著效果。国内外大量文献对人工隔层的形成过程大都是定性的描述^[3-5], 即在缝内流体压力下, 转向剂颗粒上浮或下沉到裂缝端部形成低渗透人工隔层, 对转向剂的具体作用过程和效果没有定量研究, 为此对转向剂形成人工应力遮挡的作用过程进行实验研究, 对其作用效果进行力学分析, 可为指导压裂设计和现场施工工艺可靠实施提供理论基础。

1 转向剂作用原理

实际压裂施工过程中, 井底压力达到地层破裂压力时, 地层岩石开始产生主裂缝, 压裂前置液随即进入裂缝, 注液速度大于液体滤失速度的情况下, 裂缝会继续扩展。注完前置液造出一定规模的裂缝后, 在注入混砂液之前用携带液将转向剂带入裂缝, 随着转向剂的上浮或下沉在裂缝上下尖端桥塞, 形成低渗透或不渗透的人工隔层, 增加了裂缝末梢的阻抗值, 降低了裂缝尖端的扩展应力, 如图 1 所示。

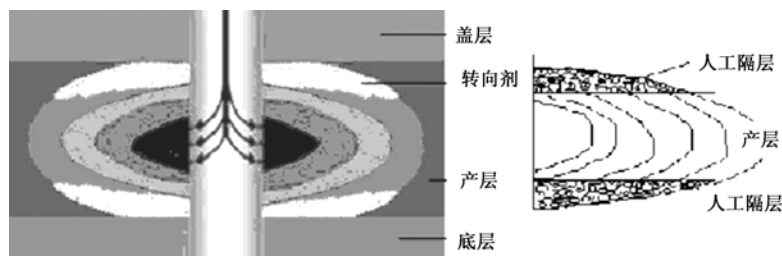


图 1 转向剂形成人工隔层的工作过程

Fig. 1 Working process of artificial barrier using diverting agent

^{*} 收稿日期: 2007-01-24; 修订日期: 2007-03-24

基金项目: 本文系中国石油化工股份有限公司重点攻关项目“低渗透砂岩油藏开发研究”(编号: P01032)

通讯作者: 俞然刚(1967—), 男, 博士, 副教授, 副院长。主要研究方向为材料性能及测试。E-mail: yurangang@hdpu.edu.cn

2 实验设计

现场采集大岩样非常困难,同时为防止岩石试样的离散性,本实验采用水泥砂浆材料模拟岩样^[6-8]。岩样既要有一定强度又要有一定渗透性,制作中通过改变水灰比、灰砂比、掺加减水剂等措施使岩样达到技术要求,水泥砂浆配比为:水灰比 0.5,水泥:砂=1:3,采用 32.5 普通硅酸盐水泥,FDN 减水剂掺量为水泥重量的 1.2%。

试件为圆台型:上顶面直径 177 mm,下顶面直径 184 mm,试件高 103.6 mm;试件中部预留模拟裂缝:长 100 mm,厚 0.4 mm,高 88 mm。模拟裂缝的制作:试件成型时插入铁片,砂浆初凝前拔出铁片。

试件安装至实验装置前采用热蜡密封:将装置上的约束钢模和热蜡加热到 70 ℃,将与密封钢模接触的试件表面滚热蜡后放入已加热的密封钢模内,逐渐冷却,利用蜡的密封性和钢模的热胀冷缩密封试件(有关试件及约束装置见图 2)。

在试件表面,正对裂缝沿垂直方向粘贴电阻应变片(图 2),实验时采用半桥测量、温度补偿,实验前预加载以消除试件与钢模侧面接触及在外力作用下试件向上滑移引起的实验误差。实验采用胜利油田采油工艺研究院研制的油溶性转向剂,经优化携带液浓度确定为 350 mg/L。实验中记录液体压力和试件表面应变,转向剂作用效果评价实验装置见图 3。

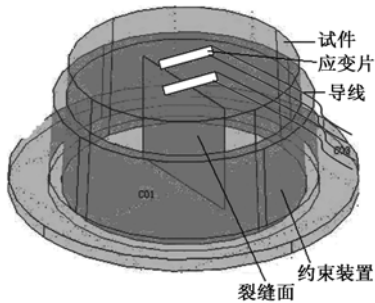


图 2 试件及约束装置

Fig. 2 Test sample and constraint device

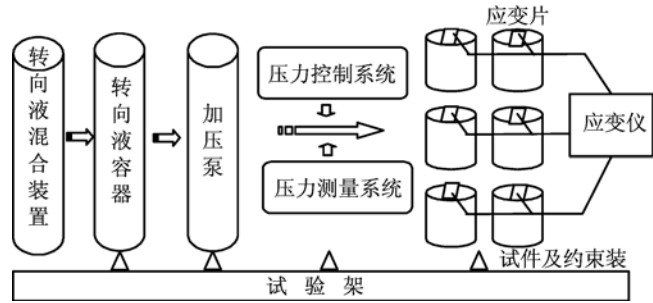


图 3 转向剂作用效果评价实验装置

Fig. 3 Experimental apparatus for acting effect evaluation of diverting agent

3 实验结果

缝内压差、渗流量对裂缝尖端应力及试件表面应变有很大影响,这里共进行了 36 个不同渗透性能试样的实验研究。随着压差的增加,试件表面应变变化值增加,即压差越大转向剂的人工应力遮挡作用越大,在渗流量 500 cm³ 以前变化幅度较大,500 cm³ 以后基本不变(图 4);不同压差条件下随渗流量的增加,试件表面应变减小,在渗流量较大后再增加渗流量转向剂的人工应力遮挡作用增加很小,在渗流量 500 cm³ 以前变化幅度较大,500 cm³ 后基本不变(图 5)。

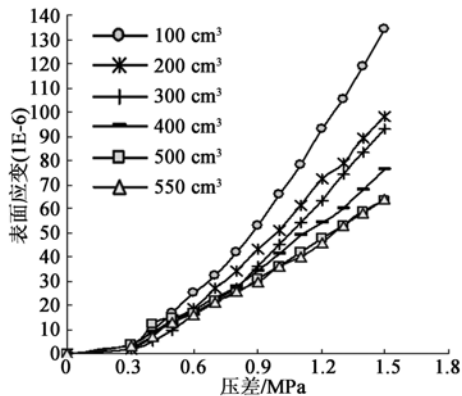


图 4 不同渗流量下压差对试件表面应变的影响

Fig. 4 The impact of pressure difference on test sample surface strain under different seepage quantity

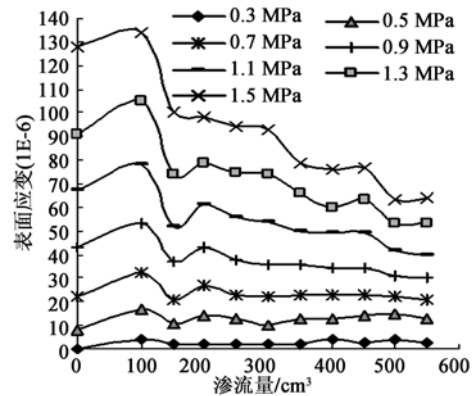


图 5 不同压差下渗流量对试件表面应变的影响

Fig. 5 The impact of seepage quantity on test sample surface strain under different pressure difference

实验中发现,开始实验时每 1 min 渗出 40 cm³ 左右液体,随着渗流量的增加,渗流速度越来越小,当总渗流量达 500 cm³ 以后流体的渗透率很小,每 6 min 左右渗出 1~2 cm³ 液体,说明随着液体的渗透,转向剂逐步填充裂缝尖端和试件孔隙,改善了裂缝尖端和孔隙的受力状态,对提高裂缝的抗扩展能力有较大的作用。

4 人工应力遮挡有限元分析

实验试件的实际尺寸如缝高、裂缝尖端到试件上表面的距离等与应变片的贴片位置有直接关系,尽管对试件表面应变的测试结果有直接影响,但这并不影响转向剂作用引起的裂缝尖端应力变化的测试结果,应用有限元分析软件 Ansys9.0 计算试件表面应变与裂缝处应力的对应关系,考察内压变化、渗流量对裂缝处应力的影响。

实测人工岩样抗压强度为 22.5 MPa,抗拉强度为 6.8 MPa,波松比为 0.238,岩样上部无钢模约束部分的高度为 35 mm,裂缝端部距上表面贴片处距离为 12 mm,有限元计算中考虑到试件 σ - ϵ 关系的非线性,按实测岩样 σ - ϵ 关系计算(见图 6),另外考虑到随液体渗流量的增加转向剂对裂缝尖端逐渐填充,有限元模型(图 7)裂缝尖端进行了平滑处理。

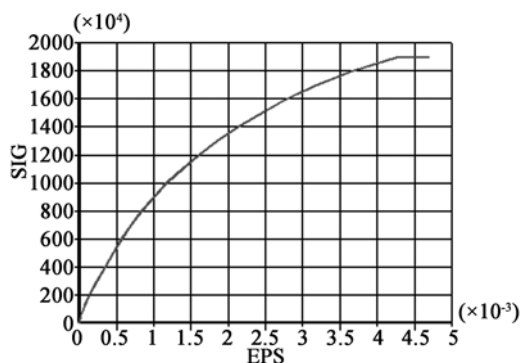


图 6 试件 σ - ϵ 关系

Fig. 6 σ - ϵ relation of test sample



图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

根据有限元计算结果,分析了不同渗流量下压差对裂缝尖端扩展应力的影响(图 8);不同压差下渗流量对裂缝尖端扩展应力的影响(图 9)。

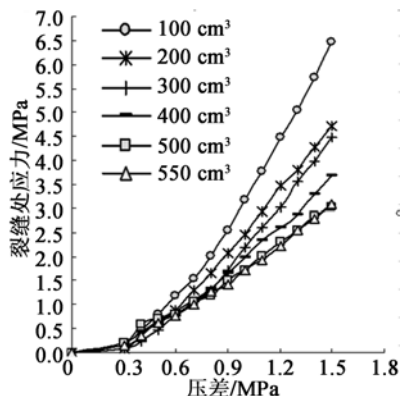


图 8 压差对裂缝尖端扩展应力的影响图

Fig. 8 Influence diagram of expanding stress in fracture tip resulting from pressure difference

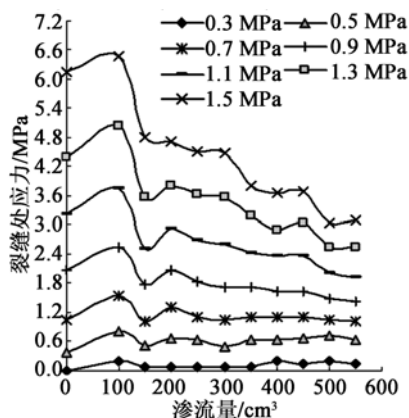


图 9 渗流量对裂缝尖端扩展应力的影响

Fig. 9 The influence of seepage quantity on expanding stress in fracture tip

由图 8 可知:裂缝处应力随携带液与地层压差的增加而增加,基本为线性关系;压差越大不同渗流量时裂缝处应力的变化也越大,即转向剂建立的人工应力遮挡作用越大;例如,在压差为 1.5 MPa 时转向剂形成的人工应力遮挡作用为 3.5 MPa 左右,压差减小转向剂作用效果逐渐减弱。

压差为 1.5 MPa 时,裂缝处应力达 6.4 MPa,已接近裂缝扩展应力,在施工时应考虑初始压差不宜

过大,随着渗透量的增加待裂缝尖端受力状态变化到一定程度后,再适当增加施工压力,使转向剂尽快填充裂缝尖端和岩石孔隙,避免压裂初期裂缝的过度延伸,施工参数还是时间与空间的函数。

由图9可知:渗流量越大转向剂对裂缝处的应力遮挡作用越大,但随着渗流量的持续增加,裂缝应力值的变化越来越小。例如,在不同的压差条件下,渗流量在 500 cm^3 以前裂缝处应力变化幅度较大, 500 cm^3 以后基本不变。

随着压差的增加裂缝应力的变化越来越大,压差小于 0.7 MPa 时,渗流量的变化对裂缝应力影响不大;压差大于 0.7 MPa 后,随着压差的增加,渗流量的变化对裂缝处应力的影响逐渐增加。

5 结论

(1) 由于目前测试手段的局限性,直接测试裂缝尖端的受力状态非常困难,采用实验与有限元计算相结合的方法可分析转向剂建立人工应力遮挡的作用过程与作用效果。

(2) 在转向剂浓度一定的条件下,渗流量越大裂缝处应力值变化越大,但随着渗流量的继续增加,裂缝应力值的变化越来越小,应有一合理渗流量;裂缝处应力随压差增加而增加,基本为线性关系,压差较小时转向剂对裂缝处应力值的影响较小,压差越大转向剂对裂缝处应力值影响越大;采用转向剂可以建立 $3\sim 4\text{ MPa}$ 的人工应力遮挡。

(3) 采用人工应力遮挡进行压裂施工时,应注意优化压裂设计,合理确定转向剂携带液的浓度、排量、施工泵压等参数。

(4) 该方法还可进一步应用于对转向剂材料的筛选与评价及转向剂与岩石的适应性分析,指导转向剂材料的研究与生产,为现场工艺的可靠实施提供指导。

参考文献:

- [1] Gidley J L. 蒋闻,单文文等译. 水力压裂技术新发展[M]. 北京:石油工业出版社,1995(Gidley J L. JIANG Dian, SHAN Wenwen, et al. Recent advance in hydraulic fracturing. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995 (in Chinese))
- [2] 姚洪生,张亚文,张文正. 长岭凹陷腰英台低渗储层压裂工艺[J]. 石油钻采工艺,2005,27(4):75~79(YAO Hongsheng,ZHANG Yawen,ZHANG Wenzheng. Fracturing Technology Research on Low Permeability Reservoir of Changling Falling Yao Yingtai Block[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(4): 75~79 (in Chinese))
- [3] Cleary M P. Analysis of Mechanisms and Procedures for Producing Favorable Shapes of Hydraulic Fractures [C]. Paper SPE 9260,Dallas:SPE Annual Technical Conf. and Exhibition,1980.
- [4] Morales,Rogelio,Fragachan,et al. Production Optimization by an Artificial Control of Fracture Height Growth[C]. Paper SPE38150,1997.
- [5] Jim Fontaine. Universal Well Services, Inc, Len Paugh,et al. Medina Stimulation: Is Bigger Really Better [C]. Paper SPE78701,2002.
- [6] 田杰,胡时胜. 准静态压缩应力-应变曲线测量方法的探索[J]. 实验力学,2005,20(2):265~268(TIAN Jie,HU Shisheng. Investigation on the Method of Measuring Quasi-Static Compression Stress-Strain Curve. Journal of Experimental Mechanics,2005,20(2):265~268(in Chinese))
- [7] 速宝玉,谢兴华,王国庆. 水泥砂浆水力劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(Supp. 1):2953~2957 (SU Baoyu,XIE Xinghua,WANG Guoqing. Hydraulic Fracture Test on Cement and Sand Mortar. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(Supp. 1):2953~2957(in Chinese))
- [8] AN Lisha, QIU Xueqing, PANG Yuxia. Effects of Different Kinds of Water-reducing Agents on Mechanical Performances of Mortar and Their Comprehensive Evaluation by Fuzzy Mathematics [J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2006,38(4).

Experimental Study and Finite Element Analysis of Artificial Stress Barrier Formed by Diverting Agent

YU Ran-gang, YAN Xiang-zhen

(China University of Petroleum (East China), Shandong Dongying 257062, China)

Abstract: Aimed at hydraulic fracture height control technology by artificial stress barrier, electro-metrical method was performed for physical model in order to test surface strains of artificial rock core under a constant concentration of diverting agent and factors such as carrying fluid, strata pressure difference, seepage quantity and time etc were considered in the experiment. Stress distributions around hydraulic fracture tips were calculated by using non-linear finite element method. The effect of artificial stress barrier formed by diverting agent was also investigated. The results show that artificial stress barrier with 3~4MPa utilizing diverting agent can be set up. Hydraulic fracturing design and construction parameters are proposed in use of diverting agent.

Keywords: hydraulic fracturing; artificial stress barrier; fracture height control; experimental study; finite element analysis