

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.12.0237

## 砂粒运移对砾石充填层损害试验与数值模拟

李彦超<sup>1,2</sup>, 李明忠<sup>1</sup>, 王卫阳<sup>1</sup>, 王磊<sup>3</sup>(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 川庆钻探工程有限公司井下作业公司, 四川 成都 610051;  
3. 中国海洋石油公司研究总院, 北京 100010)

李彦超

**摘要:** 为了研究储层砂粒运移、堵塞对砾石充填层损害造成的砾石充填防砂水平井产能的影响, 采用室内驱替试验, 应用实际油井出砂和充填砾石模拟了不同砾石与地层砂粒径比情况下, 砂粒的运移对砾石充填层渗透率的损害规律及砾石充填层堵塞机理。结果表明: 砂粒运移、侵入及堵塞导致砾石层渗透率发生明显变化, 地层砂与砾石层接触面附近损害最为严重。根据砾石与地层砂粒径比及砂粒入侵程度不同, 砾石层挡砂机理主要为地层砂未侵入、浅层桥接、深层桥接、孔隙充填和地层砂完全通过 5 种类型; 根据试验结果, 采用线性回归法建立了单位体积砾石层内地层砂堵塞量动态模型并数值仿真模拟软件, 对砂粒在砾石充填层中的运移过程进行数值仿真模拟, 模拟结果与试验结果基本一致。对定量评价地层砂颗粒运移对砾石层损害及油井产能预测有重要意义。

**关键词:** 砂粒运移; 出砂; 砾石充填; 数值模拟; 渗透率

**中图分类号:** S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2014)01-0056-04

李彦超, 李明忠, 王卫阳, 等. 砂粒运移对砾石充填层损害试验与数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(1): 56-59.

## Experiments and numerical simulations of gravel packed layer damage due to sand migration

Li Yanchao<sup>1,2</sup>, Li Mingzhong<sup>1</sup>, Wang Weiyang<sup>1</sup>, Wang Lei<sup>3</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Downhole Company, Chuanqing Drilling Engineering Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China; 3. Research Institute of China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China)

**Abstract:** As a sand control method, the gravel packing technique has been extensively applied in oil fields because of its merits, such as effective sand control effort and high well production. Naturally, reasonable explanation of its sand control mechanism and accurate prediction of well production are vital for this technique. Among many factors, sand migration is the main factor that influences the productivity of a gravel-packed well and the technique design. In order to have a better understanding on the mechanism of gravel packed layer damage caused from sand migration and plugging and to provide a theoretical basis for well productivity prediction, the damage of gravel layer permeability, which was due to sand migration, was simulated experimentally in laboratory under different gravel-sand diameter ratios that were decided according to the reservoir characteristics of sanding in an oil field and the specific sand control technique. The results show that the migration, invasion, and bridge plug of sand particles can lead to a significant change in the permeability of gravel layer; especially the damage near the interface between formation sand and gravel layer is the most serious. According to gravel-sand di-

收稿日期: 2012-12-27; 网络出版时间: 2014-01-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.12.0237.html>

基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA09Z351); 国家科技重大专项课题资助项目(2011ZX05011-003)

作者简介: 李彦超(1986—), 男, 山东费县人, 博士(lyc8603@hotmail.com), 主要从事防砂与水力压裂工艺研究。

李明忠(1963—), 男, 山东利津人, 教授, 博士生导师(limzh@upc.edu.cn), 主要从事采油工程理论与技术研究。

ameter ratio and sand intrusion degree, there are five types of mechanism for gravel blocking sand. A dynamic mathematics model is established by linear regression to predict the plug amount of formation sand per unit volume of gravel layer, and a numerical simulation is launched to simulate the experiment. The simulated results are in agreement with experimental data, suggesting the model has significance in quantitative evaluation of the damage on gravel layer caused from the migration of formation sand particles and well productivity prediction.

**Key words:** sand migration; sanding; gravel pack; numerical simulation; permeability

油井出砂是石油开采中遇到的常见问题之一,尤其是疏松砂岩油藏和稠油油藏,由于储层岩石胶结强度弱,油井周围岩石极易破坏,且稠油油藏流体拖拽力大、从而造成油井大量出砂<sup>[1-2]</sup>。油井出砂不仅会磨蚀井下和地面设备,造成井筒砂堵或砂埋油层,而且使油井产量大幅度降低,甚至停产。砾石充填防砂技术以其防砂效果好、对产能影响小等优点,在油田现场得到了广泛应用,同时针对砾石充填防砂的研究也是热门问题<sup>[3-4]</sup>。其中,地层砂颗粒运移、堵塞是影响砾石充填井有效期长短的重要因素。国内学者李爱芬等<sup>[5]</sup>、李明忠等<sup>[6]</sup>针对砾石充填防砂水平井产能预测研究过程中,应用表皮因子经验模型对砾石充填层压降损失进行评价,所需参数多,且现场获取难度大。因此,开展地层砂颗粒运移对砾石层渗透率影响研究对于认清砾石充填井堵塞机理,以及准确评价油井产能及提高防砂效果有着重要意义。国外学者 Bonhroum 等<sup>[7]</sup>、Bigno 等<sup>[8]</sup>应用均匀粒径的模拟砂,开展了砾石层堵塞机理试验研究,但是由于模拟砂与储层砂粒径组成差别较大,模拟结果与实际相差较大。国内王志刚等<sup>[9]</sup>研究了不同砾石与地层砂粒径比情况下的砾石层堵塞机理,但由于采用单段砾石层测量,不能准确地评价地层砂的运移及堵塞规律,胡才志等<sup>[10]</sup>、曾祥林等<sup>[11]</sup>、王尤富等<sup>[12]</sup>、Li 等<sup>[13]</sup>采用多点测压长岩心模拟装置开展了砾石充填井的堵塞机理试验研究,分析了地层砂运移对砾石层渗透率的影响规律,但只是定性分析了砾石层渗透率变化规律。

文中采用多功能油藏驱替试验装置模拟不同砾石与储层砂粒径比情况下,砂粒的运移对砾石充填层渗透率的影响,并通过线性回归及数值模拟方法评价砾石层渗透率的变化规律。

## 1 试验设计

### 1.1 试验装置

在国内外砾石层堵塞模拟试验装置的基础上,

设计了一套砾石层堵塞试验装置,该装置主要包括长岩心多点测压夹持系统、流动控制系统、数据采集系统和操作系统等。试验装置如图1所示。该装置:①含有3套出砂模拟管,分别长1.2,1.0和0.6 m;②可实现多点测压,在试验过程中动态监测压力分布情况,研究地层砂运移至砾石充填层不同位置时渗透率变化规律;③可直接观察不同粒径比下的地层砂运移及砾石层堵塞状况。

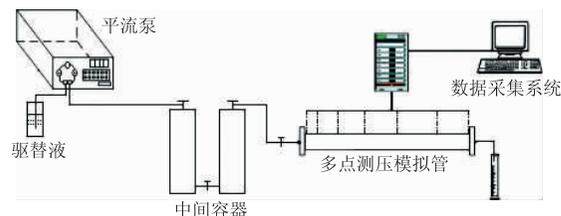


图1 试验装置流程图

Fig.1 Flow chart of experimental device

研究所采用的油藏地层砂取自胜利油田油井产出砂,为了真实反映地下岩石的实际情况,验证人造岩心的可比性,试验参照以下标准:①合理的粒度配比关系;②人造岩心孔渗特性与储集层的对比情况;③人造岩心与储集层岩心力学的对比情况。驱替液体采用无色透明驱替液,可清晰观察出砂情况,以便准确描述出砂现象;另外该驱替液黏度同油藏原油黏度相近,能更真实地反映地下流体的情况。

### 1.2 试验流程

试验采用1.2 m的出砂模拟管,其中地层砂填充厚度为27 cm,砾石层填充厚度为93 cm,并按照砾石与地层砂粒径之比( $D_{50}/d_{50}$ )为3.8,5.2,7.0,10.0,15.2分别填制5种规格的填砂管。取其中1种粒径比规格填砂管,抽真空后饱和驱替液,测定填砂管孔隙度;然后按照10 mL/min的注入速度驱替,直至压力稳定。在注入过程中,将长岩心模拟管从入口端到出口端分为5段进行测压,同时记录出口端流量变化,并检测挡砂精度。更换填砂管,重复以上步骤,依次完成不同粒径比下砾石充层渗流规律试验。

## 2 试验结果分析

不同砾石与地层砂粒径比情况下,砾石层渗透率比值  $K/K_0$  与注入孔隙体积比  $n$  之间的变化关系和地层砂堵塞试验如图 2,3 所示. 从图 2 可以看出,当  $D_{50}/d_{50}=3.8$  时,砾石层渗透率几乎不发生变化,主要是因为砾石粒径与地层砂粒径接近,完全阻止了地层砂的通过,从图 3a 可以看出,地层砂和砾石层界面明显;当  $D_{50}/d_{50}=5.2$  时,砾石层渗透率在初始阶段缓慢降低,之后很快趋于稳定,从图 3b 可以看出,地层砂在砾石充填层中有浅层桥接;当  $D_{50}/d_{50}=7.0$  时,砾石层渗透率明显降低,从图 3c 可以看出,较图 3b,地层砂在砾石充填层的侵入深度更深,为深层桥接;当  $D_{50}/d_{50}=10.0$  时,砾石层渗透率减少幅度更大,由于粒径比值增大,很难形成稳定的砂桥,故渗透率达到稳定的时间较长,从图 3d 可以看出,地层砂已经完全侵入砾石充填层;当  $D_{50}/d_{50}=15.2$  时,渗透率逐渐降低,但降低幅度较小,仅为初始渗透率的 5%,从图 3e 可以看出,砾石孔隙空间明显,仅有少量地层砂堵塞,同时,岩心出口端不断地有地层砂流出,即砾石不起挡砂作用.

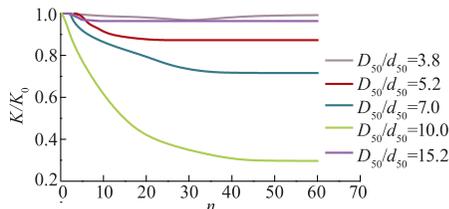


图 2 不同充填规格砾石层渗透率变化曲线  
Fig. 2 Gravel layer permeability curves under different gravel-sand diameter ratios

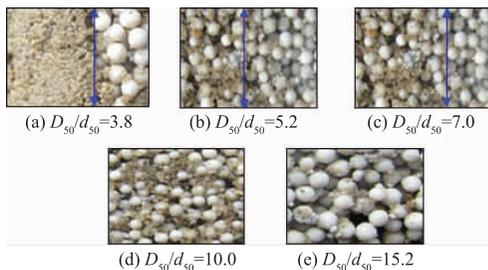


图 3 地层砂堵塞试验图

Fig. 3 Schematic of formation sand blocking experiment

## 3 室内试验数值模拟

砾石层孔隙度动态模型<sup>[5]</sup>为

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{\sigma_s}{\rho_s}, \quad (1)$$

式中: $\varphi, \varphi_0$  分别为砾石层当前孔隙度与初始孔隙度; $\sigma_s$  为单位体积砾石层内地层砂堵塞量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_s$  为地层砂密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

砾石层渗透率动态模型<sup>[5]</sup>为

$$K = K_0 \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3, \quad (2)$$

式中: $K, K_0$  分别为砾石层当前渗透率和初始渗透率,  $\mu\text{m}^2$ .

根据式(1)-(2),对以上  $D_{50}/d_{50}=5.2$  的试验结果进行回归分析,得出单位体积砾石层内地层砂体积堵塞量  $\frac{\sigma_s}{\rho_s}$  动态模型为

$$\frac{\sigma_s}{\rho_s} = a \ln t + b, \quad (3)$$

式中: $a = \eta C_s \varphi_0$ ;  $b = \eta C_s \varphi_0 \ln \left( \frac{q}{V_p} \right)$ ;  $\eta$  为地层砂堵塞系数; $C_s$  为产出流体中地层砂浓度,%;  $q$  为累积注入量, mL;  $V_p$  为砾石层孔隙体积,  $\text{cm}^3$ .

图 4 为地层砂堵塞量占孔隙体积的百分数变化图. 从图 4 中可以看出,单位体积砾石层内地层砂体积堵塞量与注入时间关系为典型的对数递增关系,  $m$  为单位体积砾石层内地层砂体积堵塞量,%;  $t$  为注入时间, min.

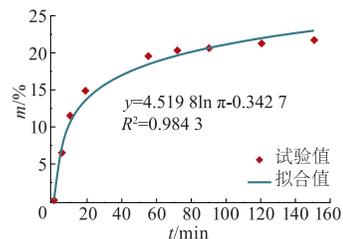


图 4 地层砂堵塞量占孔隙体积的百分数变化图

Fig. 4 Relation between plug amount of formation sand per unit volume and time

应用建立的  $\sigma_s/\rho_s$  动态模型及数值仿真模拟软件,对以上砾石层渗流规律进行数值模拟. 地层砂段长度为 27 cm,砾石层段长度为 93 cm,半径为 1.25 cm,地层砂渗透率为  $1.02 \mu\text{m}^2$ ,砾石层初始渗透率为  $78.60 \mu\text{m}^2$ ,定流量注入,流量为  $10 \text{ mL}/\text{min}$ ,具体的三维网格模型如图 5 所示.

图 6 为地层砂段和砾石充填层段压力分布图,从图中可以看出,由于砾石充填层段渗透率较大,砾石充填压力降较小,驱替压力降主要分布在地层砂段. 图 7 为砾石层渗透率变化图. 从图 7 中可以看

出,随着流体注入,砾石层渗透率呈对数递减,且数值模拟计算的渗透率与试验结果几乎一致,表明建立的单位体积砾石层内地层砂体积堵塞量  $\sigma_s/\rho_s$  动态模型理论上可行,为预测砾石层渗透率变化及砾石充填防砂水平井产能预测提供理论依据。



图5 数值仿真模型三维网格图  
Fig. 5 Mesh in 3D numerical simulation model

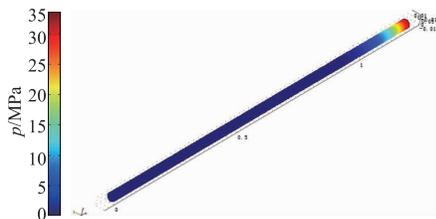


图6 计算压力分布图  
Fig. 6 Calculated pressure distribution

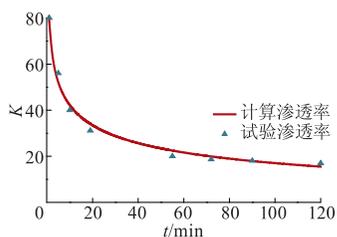


图7 砾石层渗透率变化图  
Fig. 7 Permeability variation curve of gravel layer

## 4 结 论

1) 根据砾石与地层砂粒径比不同,砾石充填层的堵塞机理有5种不同的类型:地层砂未侵入,浅层与深层桥接,孔隙充填和地层砂完全通过,由于储层砂颗粒的运移、侵入及堵塞,砾石层渗透率发生明显变化,尤其是地层砂与砾石层接触面附近损害最为严重。

2) 试验结果线性回归表明,单位体积砾石层内地层砂体积堵塞量与时间的关系为典型对数递增规律。

3) 室内试验数值仿真结果与室内试验结果几乎一致,较好地预测了砾石层渗透率动态变化,这对于准确预测砾石充填井产能等具有重要的意义。

## 参考文献 (References)

- [1] 田红,邓金根,孟艳山,等. 渤海稠油油藏出砂规律室内模拟试验研究[J]. 石油学报,2005,26(4):85-88.  
Tian Hong, Deng Jin'gen, Meng Yanshan, et al. Laboratory simulation on sand production of heavy oil reservoir in Bohai area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(4): 85-88. (in Chinese)
- [2] 孙辉,李兆敏,吴仕贵,等. 疏松砂岩油藏动态出砂定量预测技术[J]. 油气地质与采收率,2007,14(4):62-64.  
Sun Hui, Li Zhaomin, Wu Shigui, et al. Dynamic and quantitative sand production prediction method in unconsolidated sandstone reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(4): 62-64. (in Chinese)
- [3] 董长银,武龙,王爱萍,等. 基于平衡流速的水平井砾石充填 $\alpha$ 波砂床平衡高度预测与试验[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2009,33(5):80-88.  
Dong Changyin, Wu Long, Wang Aiping, et al. Prediction and experiment for wave equilibrium sand bed height in horizontal well gravel-packing based on equilibrium velocity[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2009, 33(5): 80-88. (in Chinese)
- [4] 董长银,武龙,王爱萍,等. 水平井及大斜度井砾石充填过程试验[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(2):74-82.  
Dong Changyin, Wu Long, Wang Aiping, et al. Experimental simulation of gravel-packing in horizontal and highly deviated well[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2010, 34(2): 74-82. (in Chinese)
- [5] 李爱芬,姚军,寇永强. 砾石充填防砂井产能预测方法[J]. 石油勘探与开发,2004,31(1):103-105.  
Li Aifen, Yao Jun, Kou Yongqiang. A method of calculating productivity for gravel packed well[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 103-105. (in Chinese)
- [6] 李明忠,李彦超,王卫阳,等. 考虑井筒变质量流动的砾石充填水平井产能预测[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(3):89-93.  
Li Mingzhong, Li Yanchao, Wang Weiyang, et al. Research on productivity prediction for horizontal gravel packed well considering variable mass flow in well bore [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2011, 35(3): 89-93. (in Chinese)

(下转第79页)