文章编号:1673-5005(2011)05-0082-07

机械防砂筛管挡砂介质堵塞机制及堵塞规律试验

董长银[1], 贾碧霞[2], 刘春苗[1], 吴建平[3], 王登庆[3], 孙德旭[3], 韩晓龙[4]

(1. 中国石油大学 石油工程学院,山东 青岛 266555; 2. 青海油田 钻采工艺研究院,甘肃 敦煌 736200;
3. 胜利油田 采油工艺研究院,山东 东营 257003; 4. 青海油田 天然气开发公司,青海 格尔木 816000)

摘要:针对防砂井由于机械筛管及砾石层等挡砂介质被堵塞而造成低产或停产的情况,开展防砂井挡砂介质堵塞机制研究,提出非充填带的桥架充填堵塞机制和挡砂介质内部桥架堵塞机制。利用机械筛管微观驱替堵塞模拟试验装置对机械筛管多层滤网挡砂层的堵塞过程、堵塞机制及影响规律进行系统的试验模拟,研究影响挡砂筛网堵塞程度的主要因素及其影响规律。结果表明:生产时间、出砂速度、粉细砂含量、泥质含量、原油黏度等是影响挡砂介质堵塞过程及堵塞程度的主要因素;试验结果揭示了挡砂介质堵塞程度与影响因素之间的定性和定量规律;试验数据可以通过拟合用于建立挡砂介质堵塞渗透率比与上述参数之间的定量经验关系模型,进一步预测特定地质与生产条件下防砂井挡砂介质堵塞程度随生产时间的变化规律。

关键词:防砂; 机械筛管; 挡砂介质; 堵塞机制; 堵塞规律; 试验研究

中图分类号: TE 358.1 **文献标志码**:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.015

Blocking mechanism and blocking laws experiments of sand retention media in mechanical screens

DONG Chang-yin[1], JIA Bi-xia[2], LIU Chun-miao[1], WU Jian-ping[3],
WANG Deng-qing[3], SUN De-xu[3], HAN Xiao-long[4]

(1. *School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266555, *China*;
2. *Drilling and Production Research Institute of Qinghai Oilfield*, *Dunhuang* 736200, *China*;
3. *Oil Production Technology Research Institute of Shengli Oilfield*, *Dongying* 257003, *China*;
4. *Natural Gas Exploration Company*, *Qinghai Oilfield*, *Geermu* 816000, *China*)

Abstract: The productivity of sand control wells tends to decrease considerably due to the gradual blocking of sand retention media in screen or gravel-pack by formation fines and others. Aimed at the above problem, the blocking mechanism of screen porous media was studied, which concerns non-packed cavity outside screen bridge packing mechanism and the mechanism of inner bridge blocking of screen media. The blocking process, blocking mechanism and affecting regularity of multi-layer sand retention media were simulated by a visual blocking simulation experimental apparatus. The experimental results indicate that the production time, sand production rate, fines content in formation sand, clay content, oil viscosity are the main factors to affect the blocking process. The qualitative and quantitative relationships between the above factors and the final blocking damage degree are presented by using the experimental data, which can be used to fit the empirical formula describing the above relationships. It's very helpful to predict the variation of sand retention media blocking degree with the production time under given reservoir and production conditions.

Key words: sand control; mechanical screen; sand retention media; blocking mechanism; blocking law; experimental study

疏松砂岩油藏防砂井的生产实践表明,挡砂介质(机械筛管的挡砂层和砾石层)的堵塞已经逐步成为困扰防砂井正常生产的主要问题之一[1]。防砂井生产过程中,地层流体携带地层细砂、机械杂质、黏土泥质等固相堵塞物冲击挡砂介质,如果固相介质不能顺利通过挡砂层,则会附着或侵入挡砂层

收稿日期:2011-06-29

基金项目:国家自然科学基金项目(50704035);国家"863"计划项目(2006AA09Z351)

作者简介:董长银(1976-),男(汉族),河南卫辉人,副教授,博士,从事采油工程、多相流、油气井防砂理论与技术研究。

内部;如无法排出则会造成挡砂层渗透率降低,形成堵塞,进而严重影响油井产量。关于防砂井堵塞机制的研究目前主要集中在较厚的挡砂砾石层的堵塞机制方面[2-5],主要通过试验手段研究地层细砂在砾石层多孔介质中的侵入和运移机制,单纯分析地层砂粒径、侵入量及侵入厚度对砾石层渗透率的影响规律。文献[6]~[10]中对注聚合物防砂井的堵塞物成分进行了化验分析,并提出了相应的化学解堵方法。上述关于防砂井堵塞机制的研究没有涉及大量应用的机械防砂筛管较薄的挡砂滤网介质的堵塞机制与规律,并且关于粉细砂、泥质含量、产量、出砂速度、流体黏度对堵塞过程及堵塞程度的影响机制及规律的研究较欠缺。针对上述问题,笔者开展机械防砂筛管挡砂介质堵塞机制及堵塞规律的试验研究,分析影响堵塞过程的主要因素及其影响规律,为堵塞防砂井的解堵施工参数优化设计及解堵效果预测提供理论依据。

1　机械筛管挡砂介质的堵塞机制

1.1　挡砂介质特征及堵塞物来源

油气井防砂使用的机械防砂筛管主要有绕丝筛管、割缝衬管、金属棉滤砂管、树脂石英砂滤砂管、金属网布(毡)滤砂管、精密复合微孔滤砂管等,在滤砂管内部有滤砂层即挡砂介质。机械筛管防砂井在生产过程中挡砂介质容易被泥质、粉细砂等堵塞物堵塞,造成筛管渗透率降低,形成新的表皮系数,从而造成油井产量降低甚至停产。虽然应用的机械防砂筛管介质多达十几种,但其挡砂介质多为多层滤网类、割缝缝隙类、金属棉类和颗粒类 4 类。挡砂介质实质是固相多孔介质,具有一定的孔喉尺寸及渗透率和孔隙度,其渗透性保证足够的流体通过能力,而孔喉尺寸决定了其挡砂性能。

防砂井挡砂介质堵塞物主要为固相颗粒,其主要来源有:①地层粉细砂,即地层出砂中的细质成分;②黏土泥质,主要为地层胶结物中的黏土矿物等[6];③钻完井过程中固相污染物,如钻井液固相颗粒、射孔造成的碎屑等;④原油中的胶质沥青质;⑤生产过程中形成的有机垢和无机垢[7]。固相堵塞物提供了堵塞源,而其堵塞过程和堵塞程度则受固相堵塞物成分、油井产量、出砂速度、原油黏度等因素的影响。

1.2　堵塞机制

(1)非充填空间的分选桥架充填堵塞机制。对于机械筛管防砂,施工后井内油层部位下入机械筛管阻挡从地层产出的地层砂,在筛管与套管之间形成环空,该环空及射孔孔眼内均无充填物充填,称为非充填带。油井投产后,地层流体携带固相颗粒(地层砂及堵塞物)产出,固相颗粒会以分选桥架的机制充填满机械筛管外部的非充填带,形成低渗透层,对油井造成堵塞,降低产量。分选桥架机制是指地层砂伴随堵塞物随地层流体产出冲击防砂筛管。在生产初期,部分足够细的固相颗粒进入筛管挡砂介质内部(或被继续排出或堵塞在挡砂介质内部),而粒径大于挡砂介质孔喉直径或缝宽的固相颗粒无法进入挡砂介质内部而被阻挡在筛管外部,较粗的颗粒堆积到一定厚度后,形成新的多孔介质挡砂层,但其孔喉尺寸更小。该孔喉很小的多孔介质会阻挡更细的地层砂粒。以此类推,直到空间被完全充填。从筛管向外部延伸,堵塞的颗粒粒径越来越小,其渗透性也越来越低,增加流动阻力,造成油井产量下降。

(2)筛管挡砂介质内部桥架堵塞机制。挡砂介质内部桥架堵塞机制是指细质固相颗粒进入挡砂多孔介质内部,挡砂介质孔隙的不规则性及非均质性导致进入的固相颗粒难以排出,造成机械筛管渗透率降低,形成堵塞。无论是钻井液中的固相颗粒还是射孔过程中产生的微粒以及地层粉细砂都会对挡砂介质渗透率产生影响。对原始渗透率较高的机械防砂筛管,严重堵塞情况下渗透率伤害会超过 90%。

根据上述分析,筛管挡砂介质内部桥架堵塞过程及最终堵塞程度与固相堵塞物成分、油井产量、出砂速度、原油黏度等因素直接相关。

2　挡砂介质堵塞规律试验

2.1　试验目的与试验方法

机械筛管挡砂介质堵塞规律试验的目的是通过室内堵塞试验研究堵塞程度随驱替时间、流量、粉细砂含量、泥质含量、原油黏度等生产条件变化的定性和定量关系,为堵塞程度预测及解堵参数设计提供基础和依据。

利用机械筛管微观驱替堵塞模拟试验装置进行堵塞规律试验。使用含有堵塞物的流体长时间驱替挡砂筛网,同时测量挡砂筛网两侧的驱替压差。驱替过程中流体携带的堵塞物会逐步堵塞筛网,测量筛网两侧压差与流量,便可计算其渗透率随时间的变化,这种变化反映筛管堵塞情况。

挡砂介质的堵塞过程实质是挡砂介质渗透率的变化从而对油井产能产生不良影响的过程,其堵塞程度使用挡砂介质堵塞渗透率 k 及渗透率比 k_r 的变化量表示。

挡砂介质堵塞渗透率 k 直接反映堵塞过程对井

底流动造成的影响。堵塞过程中,随着生产时间的增加,挡砂介质渗透率越来越低;渗透率越低或下降得越快,表示堵塞越严重。试验过程中,挡砂筛网或砾石层的堵塞渗透率根据采集得到的流量及压差数据计算

$$k_s = \frac{Q\mu L_s}{A\Delta p}. \tag{1}$$

式中,k_s 为筛网或砾石层堵塞渗透率,μm^2;Q 为采集的流体流量,m^3/s;μ 为流体黏度,Pa · s;L_s 为筛网挡砂厚度,m;A 为筛网面积,m^2;Δp 为通过挡砂介质两侧的压差,Pa。

挡砂介质堵塞渗透率比 k_r 是指堵塞后的挡砂介质渗透率与挡砂介质原始渗透率 k_{s0}(入井前未堵塞时的最高渗透率)的比值,即

$$k_r = k_s / k_{s0}. \tag{2}$$

2.2 试验装置与试验材料

挡砂介质堵塞规律试验采用中国石油大学(华东)油气井防砂实验室的机械筛管微观驱替堵塞模拟试验装置。该装置由主体容器、泵、沉砂计量罐、储液罐、流量压力测量仪器、管线及阀门、摄像器材、数据采集系统、配套管线及其他附件组成,如图 1 所示。

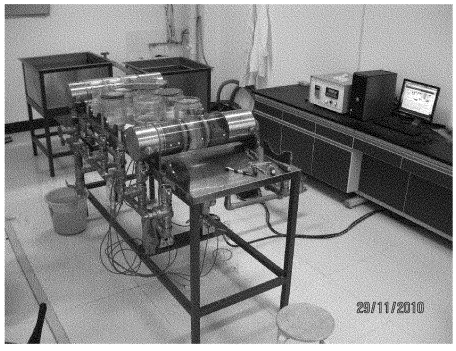
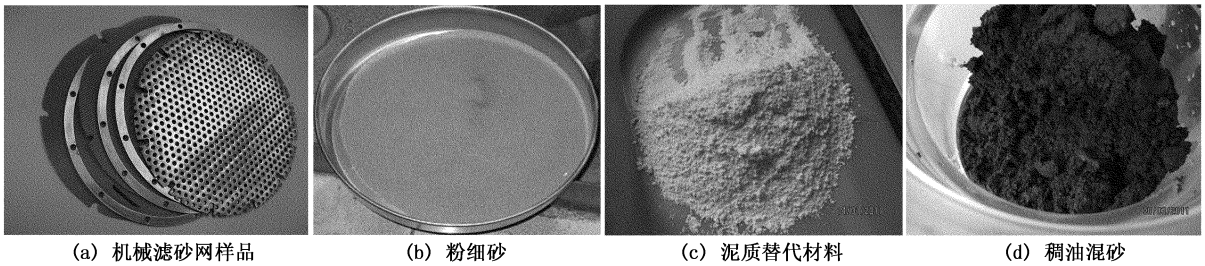


图 1 机械筛管微观驱替堵塞模拟试验装置

Fig. 1 Experimental equipment of micro displacement and plugging simulation

堵塞规律试验的环境为室内,温度为室内常温;试验流体采用清水及瓜胶黏性溶液。挡砂介质使用多层机械滤砂网样品,如图 2(a)所示。流体中混入堵塞物,由石英砂/陶粒砂(作为基质)、地层粉细砂、泥质(使用其他微细材料代替)、稠油按不同比例混合。试验堵塞物如图 2(b)、(c)、(d)所示。



(a) 机械滤砂网样品 (b) 粉细砂 (c) 泥质替代材料 (d) 稠油混砂

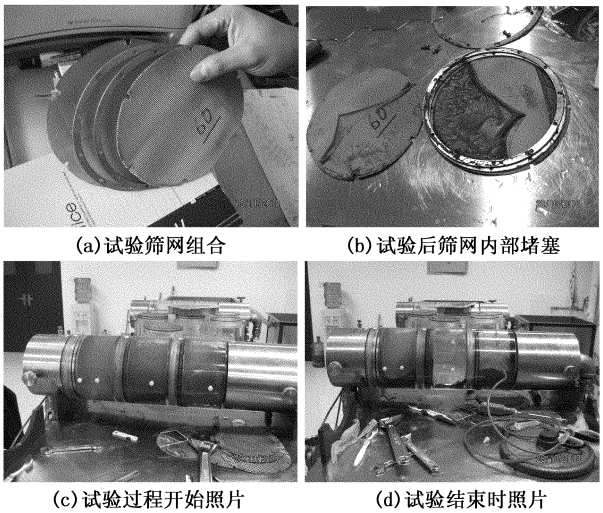
图 2 试验材料

Fig. 2 Materials used for experiments

3 试验结果分析

3.1 堵塞过程试验结果

使用上述试验装置和材料进行了系列挡砂介质堵塞机制及规律试验。通过 60#(理论挡砂精度为 0.167 ~ 0.183 mm)和 90#(0.100 ~ 0.110 mm)筛网的堵塞试验分析挡砂筛网的堵塞过程。本次试验堵塞物由 100% 的粒径在 0.18 mm 以下粉细砂组成,使用清水驱替,泵频 30 s^{-1},驱替流量为 7 ~ 9 L/min。图 3(a)为本次试验使用的两层筛网组合;图 3(b)为试验结束后,拆开筛网内部的堵塞情况。在筛网之间堵塞了部分侵入筛网内部的砂粒,部分砂粒进入筛网内部且无法排出,造成堵塞。图 3(c)、(d)分别为试验开始、结束时的照片。部分极细的砂粒顺利通过筛网,但部分侵入筛网内部的砂粒堵塞筛网介质。



(a)试验筛网组合 (b)试验后筛网内部堵塞

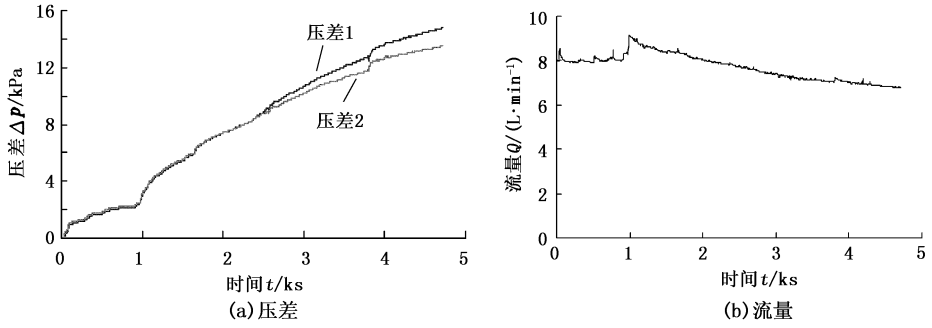
(c)试验过程开始照片 (d)试验结束时照片

图 3 60#/90#筛网及 100% 粉细砂堵塞试验照片

Fig. 3 Photos of plugging simulation test

(60#/90# mesh and 100% fines)

图 4 为筛网两侧压差及流量变化曲线。在流量基本稳定的情况下,筛网两侧压差(图 4(a)中压差 2)逐步上升,说明筛网的渗透率由于堵塞作用而逐步下降,表明了筛网的堵塞过程。图 5 为根据试验数据计算得到的筛网渗透率及渗透率比随驱替时间的变化曲线。在试验开始后筛网渗透率迅速下降至筛网原始渗透率的 14% 左右,然后降速减缓,最后趋于稳定,保持在原始渗透率的 1% 左右。



(a)压差　　(b)流量

图 4　60#/90#筛网 100% 粉细砂堵塞试验压差和流量曲线

Fig. 4　Differential pressure and flow rate curves in blocking test(60#/90# mesh and 100% fines)

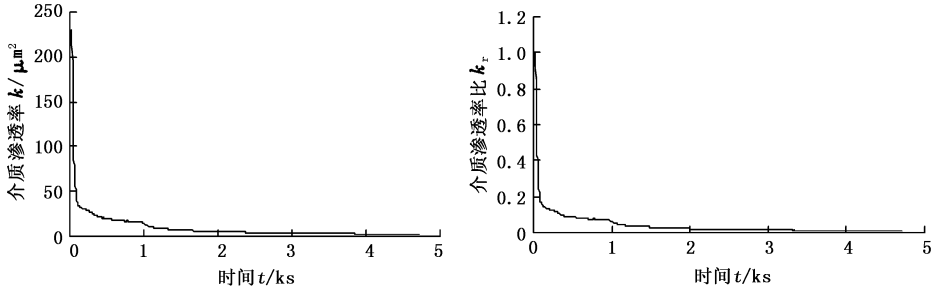


图 5　筛网渗透率变化曲线

Fig. 5　Variation curves of screen permeability

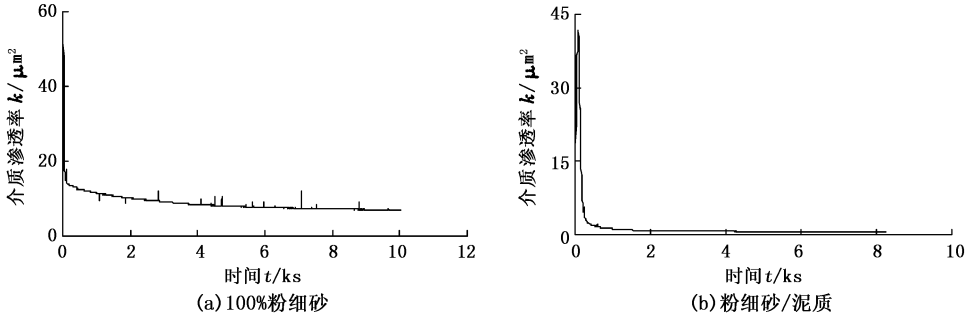
60#/90#筛网 100% 粉细砂堵塞试验条件及结果为:混细砂比例 100% 、初始流量 8.0 L/min、平均流量 7.67 L/min、初始驱替压差 1.324 3 kPa、平均驱替压差 8.569 3 kPa、最终驱替压差 13.218 2 kPa、平均渗透率 5.99 μm²、最终渗透率 2.44 μm²、平均渗透率比 0.022、最终渗透率比 0.009、平均渗透率伤害 0.978、最终渗透率伤害 0.991。

3.2　堵塞程度影响因素及其影响规律

将各堵塞物成分按不同比例混合形成不同类型的堵塞物,每次试验改变试验条件参数便可得到堵塞程度随堵塞时间以及各试验参数之间的变化规律。

3.2.1　试验时间

图 6 为两次典型的堵塞试验过程中挡砂介质堵塞渗透率随时间的变化曲线。



(a)100%粉细砂　　(b)粉细砂/泥质

图 6　100% 粉细砂和粉细砂/泥质堵塞程度变化试验结果

Fig. 6　Test plugging degree curves of 100% fines and fines/clay

由图 6 可知,在试验开始后介质渗透率迅速下降并降得很低,然后缓慢降低,最后趋于稳定。其余系列试验均反映了这一规律。由于试验中的堵塞物含量较高,因此堵塞达到稳定时间较短。这表明对于防砂水平井,挡砂介质的堵塞主要发生在防砂后投产的早期,随着生产继续,堵塞虽然逐步加剧但堵塞程度变化减缓。

3.2.2 堵塞物中粉细砂含量

不同粉细砂含量(基质为砾石)下试验压差、渗透率伤害变化曲线如图 7 所示。

由于堵塞物中粉细砂含量不同,驱替压差及渗透率伤害过程表现出明显差异。堵塞物中粉细砂含量越高,堵塞速度越快。图 8 为根据 3 次试验得到的最终驱替压差与堵塞渗透率随粉细砂含量的变化关系。堵塞物中粉细砂含量越高,同样条件下最终堵塞越严重。

3.2.3 堵塞物中泥质含量

不同泥质含量下的试验驱替压差及最终堵塞渗透率比变化曲线如图 9 所示。

结果表明,在流量基本相同的情况下,由于泥质含量不同,试验过程中的驱替压差有明显差异,泥质含量是影响堵塞程度的主要因素之一。堵塞物中泥质含量越高,驱替压差上升越快,表明堵塞速度及最终堵塞程度随泥质含量的增加而明显增加。

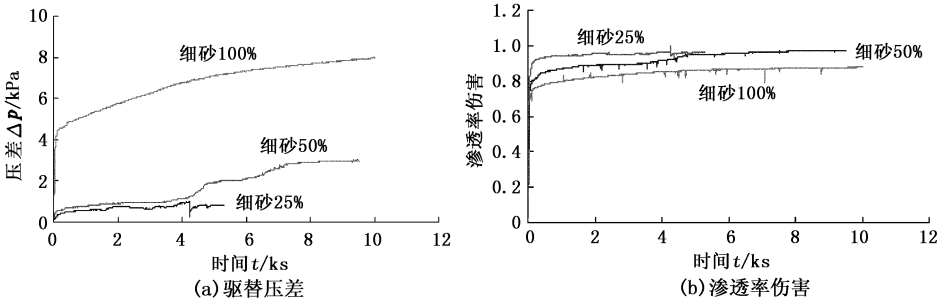


图 7 不同粉细砂含量试验中驱替压差和渗透率伤害曲线

Fig. 7 Test differential pressure and permeability damage curves under different fine contents

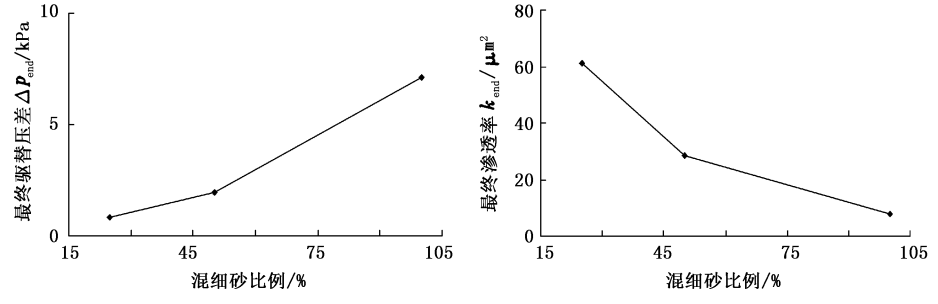


图 8 最终驱替压差和堵塞渗透率随粉细砂含量变化的关系曲线

Fig. 8 Final test differential pressure and permeability curves under different fine contents

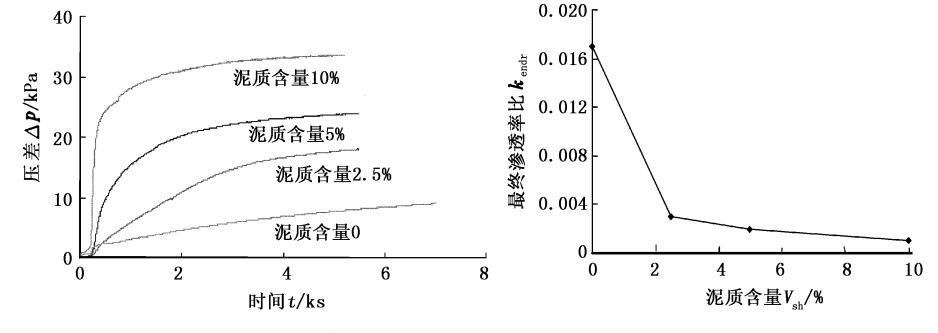


图 9 不同泥质含量试验的压差对比及最终堵塞渗透率曲线

Fig. 9 Comparision of differential pressure and final permeability ratio under different clay contents

3.2.4 流体黏度

图 10 为分别使用清水与瓜胶溶液(10 mPa · s)时的驱替压差对比曲线,图 11 为堵塞物不同泥质含量条件下分别使用清水与瓜胶溶液驱替得到的最终堵塞渗透率对比曲线。

试验结果表明,高黏瓜胶溶液堵塞试验的挡砂介质渗透率随泥质含量的变化规律同使用清水时一致,都随着泥质含量的增加而降低。在其他条件相同的情况下,以瓜胶溶液作驱替液时介质的最终渗透率总明显低于以清水作驱替液时的情况,即挡砂介质最终堵塞渗透率随着流体黏度的增大而降低。这表明,地层流体黏度对挡砂介质堵塞过程及程度有明显影响,

稠油油藏中较高原油黏度会加剧堵塞过程。

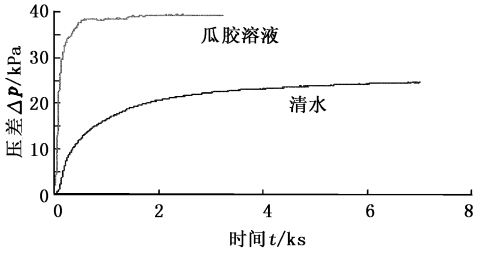


图 10　清水与瓜胶溶液驱替的压差曲线

Fig. 10　Displacement differential pressure with of water and gel

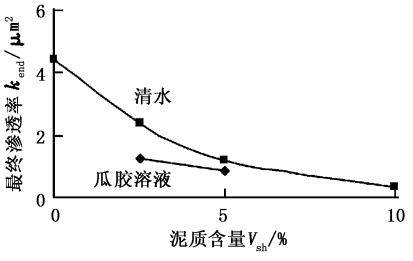


图 11　清水与瓜胶驱替时的最终渗透率随泥质含量变化

Fig. 11　Variation of final permeability with clay content of water and gel displacement

3.2.5　流量(油井产量)

图 12 为其他试验条件相同、驱替介质不同条件下得到 4 组试验的最终堵塞渗透率随驱替流量的变化曲线。试验流量(对应油井产量)对堵塞程度的影响体现出无规律的特征,根据试验条件不同,堵塞程度随流量增加出现加剧和减弱现象,其影响规律具有非单调性。本试验中,由于堵塞物是被流体携带冲刷筛网,因此高流量的试验中流体携砂能力强,出砂速度较快。根据前面的堵塞机制分析,高出砂速度时,筛网外围的非充填空间迅速被来砂桥架充填,形成附加过滤层,堵塞物被流体携带进入筛网内部从而使得被堵塞的几率大大降低;当出砂速度较慢时,来砂中的细质堵塞物更有机会逐步侵入筛网内部堵塞挡砂介质。

根据上述分析,防砂井防砂后的出砂速度(即产液量与含砂率的乘积)对于挡砂介质堵塞过程及堵塞程度有重要影响。

3.3　试验结果的应用

系列挡砂介质堵塞机制及规律试验表明,影响挡砂介质堵塞过程及堵塞程度的主要因素包括油井液体含砂率、粉细砂含量、泥质含量、原油黏度、产量、生产时间等。试验得到的定性及定量数据结果,经过流速与生产时间等效折算后,其影响规律可应用实际防砂油井的挡砂介质堵塞规律研究,通过经验拟合建立挡砂介质堵塞渗透率比 k_r 与上述参数之间的定量经验关系模型,进而开发配套的防砂井堵塞评价与预测软件,用于预测特定的地质与生产条件下防砂井挡砂介质堵塞程度随生产时间的变化规律,为解堵工艺的选择以及解堵施工参数的优化提供依据。

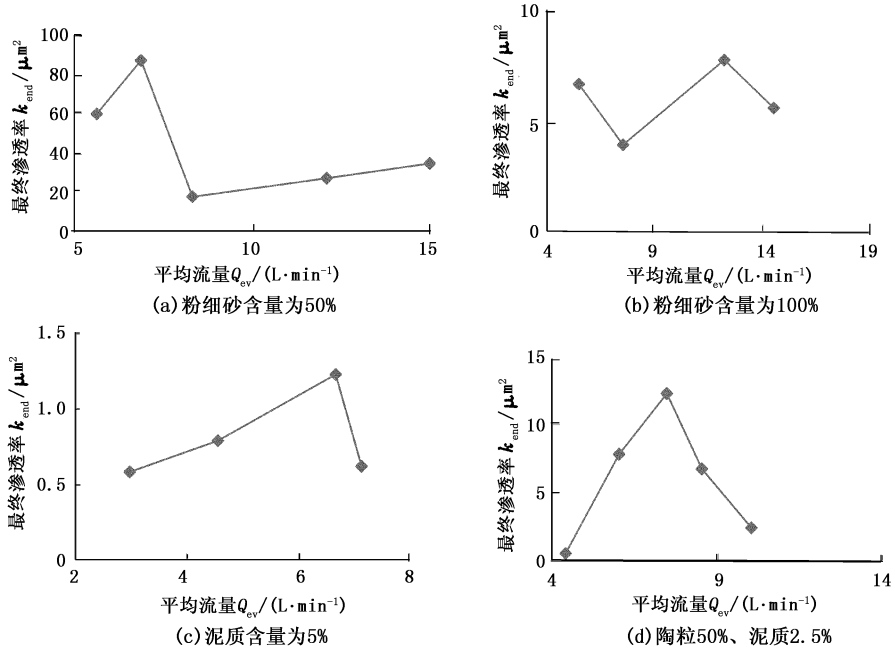


图 12　最终堵塞渗透率随流量的变化

Fig. 12　Variation of final plugging permeability with flow rate

4 结 论

(1)生产时间、出砂速度、粉细砂含量、泥质含量、流体黏度等是影响挡砂介质堵塞过程和堵塞程度的主要因素。粉细砂、泥质、高黏流体均会加剧堵塞,而出砂速度对筛管挡砂介质内部桥架堵塞的影响规律呈现非单调性。

(2) 试验得到的定性及定量数据可应用于实际防砂油井的挡砂介质堵塞规律研究,建立的挡砂介质堵塞渗透率比与生产参数之间的定量经验关系模型可用于预测特定地质与生产条件下防砂井挡砂介质堵塞程度随生产时间的变化规律。

(3) 在堵塞规律试验中,液体中固相含砂率的控制非常难以接近现场实际情况,试验中的含砂率普遍较高,导致堵塞时间难以模拟实际井的堵塞生产时间。

参考文献:

[1] 董长银. 油气井防砂技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009:47-55.

[2] AHSENE Bouhroum. A study of particulates migration in gravel pack[R]. SPE 27346, 1994.

[3] 胡才志, 裴柏林, 李相方,等. 砾石充填井堵塞机理实验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(3):40-42.
HU Cai-zhi, PEI Bo-lin, LI Xiang-fang, et al. Laboratory research on plugging mechanism in gravel packed well [J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science),2004,28(3):40-42.

[4] 王志刚,李爱芬. 砾石充填防砂井砾石层堵塞机理实验研究[J]. 石油大学学报:自然科学版,2000,24(5):49-51.
WANG Zhi-gang, LI Ai-fen. Experimental study on pore-blocking mechanism in gravel packs of sand control well [J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science),2000,24(5):49-51.

[5] OYENEYIN M B, PEDEN J M. Factors to consider in the effective management and control of fines migration in high permeability sands[R]. SPE 30112, 1995.

[6] 刘东,李丽,周承诗,等. 注聚区油井防砂层堵塞原因与解堵措施[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(2):78-81.
LIU Dong, LI Li, ZHOU Cheng-shi, et al. Plugging mechanism and plug removing of sand control area in polymer injection well[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2010,34(2):78-81.

[7] 伍泰荣. 有机垢对地层堵塞的室内实验研究[J]. 石油钻探技术,2004,32(5):59-61.
WU Tai-rong. Lab test on reservoir choke caused by organic scale[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004,32(5):59-61.

[8] 徐昆,赵立强,宋爱丽,等. 渤海 SZ36-1 油田注聚井堵塞原因分析[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版,2010,12(5):35-37.
XU Kun, ZHAO Li-qiang, SONG Ai-li, et al. Plugging analysis of polymer injection wells in Bohai SZ36-1 Oilfield[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology, 2010,12(5):35-37.

[9] 关德. 渤海两油田油井堵塞原因分析及化学解堵试验[J]. 西南石油学院学报,2002,24(2):35-37.
GUAN De. Diagnosis of reasons for oil well plugging and chemical remedial treatment tests at two oilfields in Bohai Bay[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(2):35-37.

[10] 张贤松,孙福街. 渤海稠油油田聚合物驱影响因素研究及现场试验[J]. 中国海上油气,2007,19(1):30-32.
ZHANG Xian-song, SUN Fu-jie. A research on influence factors of polymer flooding and its field testing in Bohai heavy oil fields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2007,19(1):30-32.

(编辑 李志芬)