

注聚驱防砂井挡砂介质物理化学复合 堵塞机制试验

董长银¹, 高凯歌¹, 王 静², 智勤功², 高聚同³, 张清华¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院, 山东东营 257000;
3. 中国石化胜利油田分公司孤东采油厂, 山东东营 257237)

摘要:针对孤东油田注聚驱防砂井液量降低严重并且绕丝筛管砾石充填防砂井的提液效果普遍低于树脂滤砂管独立筛管防砂的反常现象,首先通过砾石层特性评价试验研究地层砂对砾石层侵入及机械物理堵塞机制,得到砾石层堵塞与砾砂中值比、泥质含量、流体黏度、产量、生产时间以及聚合物的定性和定量关系。针对物理堵塞机制难以解释砾石充填和树脂滤砂管防砂堵塞现象的问题,开展普通石英砂与树脂涂敷砂的润湿性、沥青质吸附、聚合物及其衍生物吸附机制与规律试验对比,提出注聚驱防砂井的物理化学复合堵塞机制。研究表明:物理堵塞主要发生在投产早期,堵塞程度随着流体黏度、泥质含量、产量、聚合物含量、砾砂比(GSR)增加而趋于严重;与树脂涂敷砂相比,石英砂充填层表面强亲水,其对聚合物及其衍生物和胶质沥青质的表面吸附量远高于高渗滤涂敷砂,吸附量随着聚合物浓度增加以及石英砂粒径的减小而增大。在注聚驱条件下,原本高孔高渗的石英砂充填层复合堵塞后的渗透率反而远低于高渗滤砂管。

关键词:挡砂介质;复合堵塞机制;砾石充填;沥青质吸附;聚合物吸附;聚合物驱;孤东油田

中图分类号:TE 358 **文献标志码:**A

引用格式:董长银,高凯歌,王静,等. 聚合物驱防砂井挡砂介质物理化学复合堵塞机制试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(5):104-111.

DONG Changyin, GAO Kaige, WANG Jing, et al. Experimental study on mechanical and chemical combined plugging mechanism of sand control media in heavy oil reservoirs with polymer flooding[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(5): 104-111.

Experimental study on mechanical and chemical combined plugging mechanism of sand control media in heavy oil reservoirs with polymer flooding

DONG Changyin¹, GAO Kaige¹, WANG Jing², ZHI Qingong², GAO Jutong³, ZHANG Qinghua¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Research Institute of Petroleum, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257000, China;
3. Gudong Oil Production Plant, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257237, China)

Abstract: During polymer flooding of heavy oil reservoirs in Gudong Oilfield, the well productivity decreased greatly in the early production stage after sand control measures were applied. It was observed that it is much more difficult for wells with wire-wrapped screen gravel-pack for sand control to achieve better performance than wells with resin-coated screen stand-alone method, which is inconsistent to the usual practice. In this study, series of experiments were firstly conducted to reveal the mechanisms of sand invading and plugging in the gravel packs. The influence of gravel-sand ratio (GSR), clay content, fluid viscosity, flow rate and production time on plugging rate in the presence of heavy oil and polymer were investigated. In order to investigate the chemical plugging mechanisms, the effects of wettability, asphaltene adsorption, polymer adsorption on clean

quartz gravel and resin-coated gravel were then tested and analyzed. Based on the experiment results, a combined mechanical and chemical plugging mechanism was proposed to explain to the cumulated plugging phenomenon during polymer flooding. The experimental results indicated that, for the gravel packs with clean sands, mechanical plugging of the sand retention media takes place in the early stage of the production, and high GSR, fluid viscosity, clay content, production rate and polymer content tend to increase the plugging rate. In comparison with the resin-coated gravels, the clean quartz sand gravel is of higher water wettability and has high capacity to adsorb asphaltene and polymers, which was also verified by adsorption testing at different conditions. The polymer adsorption on the gravel surface increases with the polymer concentration and small gravel size. It is concluded that, during polymer flooding of heavy oil reservoirs, the reason for the permeability reduction of the clean sand packed gravel can be attributed the chemical plugging induced by polymer and heavy oil components.

Keywords: sand retention media; combined plugging mechanism; gravel pack; asphaltene adsorption; polymer adsorption; polymer flooding; Gudong Oilfield

孤东油田六区和七区开发单元是典型的疏松砂岩油藏,采用聚合物驱,形成了以绕丝筛管砾石充填和高渗透树脂滤砂管为主的防砂工艺技术。近年来,注聚单元逐步进入油井见聚后,油井防砂后产液量大幅下降,初步判断是因近井防砂介质堵塞,并且在注采比稳定和井况条件相似情况下,绕丝筛管砾石充填防砂并提液效果明显低于树脂滤砂管防砂井所致,这与砾石充填比独立筛管防砂产能高的传统认识^[14]相悖,使用常规物理堵塞机制难以解释,须开展深入的堵塞机制研究以及相应的防砂工艺优化。防砂并挡砂介质堵塞研究主要集中在砾石充填层和防砂筛网的机械堵塞规律方面^[5-11]。文献[5]~[8]中通过驱替试验研究了砾砂中值比(砾石层粒度中值与地层砂粒度中值的比值,gravel-sand ratio,GSR)对地层砂侵入砾石层的影响,以及地层砂侵入砾石层的物理过程,其试验过程没有模拟细质和泥质以及其他堵塞物成分的影响。刘东等^[9]通过试验测试对注聚油井防砂层注聚前后砂样的形态和表面物种组成进行分析,得出了聚合物在砂粒表面吸附的结论,初步揭示了注聚驱油井的部分堵塞原因,但其研究尚未完全揭示注聚驱井的堵塞机制;董长银等^[10]针对防砂筛管的机械筛网堵塞进行了试验研究,但未涉及砾石层;伍泰荣等^[11-14]对注聚井地层的堵塞进行了研究,但未涉及防砂并挡砂介质。综上所述,目前关于防砂层堵塞的研究主要为机械物理堵塞,对于注聚驱防砂并化学堵塞研究鲜有报道。笔者在砾石层物理堵塞研究的基础上,开展普通石英砂与树脂涂敷砂的润湿性、沥青质吸附、聚合物及其衍生物吸附机制与规律对比试验,提出注聚驱防砂并的物理化学复合堵塞机制。

1 砾石层物理堵塞试验

1.1 防砂井井底挡砂介质

树脂滤砂管独立筛管防砂是在油层部位下入树

脂滤砂管阻挡从地层产出的地层砂,孤东油田使用的树脂滤砂管挡砂介质是由石英砂、氰酸酯树脂、三氯苯酚固化剂按照 100 : 20 : 1.5 比例混合固结,包裹在带孔基管上形成。固结层挡砂介质渗透率为 15 ~ 20 μm^2 。

绕丝筛管砾石充填防砂是将绕丝筛管下入井内防砂层段处,在筛管与套管环空充填普通石英砂,形成一定厚度的砾石层,达到防砂目的。绕丝筛管砾石充填防砂的挡砂介质为砾石充填形成的不规则孔喉结构,石英砂粒径一般为 0.3 ~ 0.58 mm 和 0.42 ~ 0.84 mm,未压实状态下的渗透率约能够达到 50 和 80 μm^2 ,约为树脂滤砂管渗透率的 5 ~ 7 倍;平均孔喉直径^[15]分别为 0.09 和 0.12 mm;其高孔高渗的特点使地层细砂容易侵入。

1.2 试验原理与方法

砾石层物理堵塞机制试验装置如图 1(a)所示,将石英砂装填于单向流透明容器短节(图 1(b)),使用不同黏度流体携带地层砂驱替充填有砾石层的短节,同时测量挡砂砾石层短节两侧的驱替压差和流量,计算渗透率变化。由于地层砂侵入并堵塞砾石层,其驱替压差、流量和渗透率均会随时间发生变化。最终通过渗透率和渗透率比(堵塞状态的渗透率与初始渗透率的比值,K)表征砾石层堵塞程度。

试验使用的石英砂为油田常用的 0.42 ~ 0.84 和 0.6 ~ 1.18 mm 粒径普通石英砂,使用的地层砂粒度中值分别为 0.16、0.124、0.10、0.095 和 0.06 mm。试验流体共 5 种,分别为清水和 4 种增黏水,黏度分别为 1.0、10、31、58 和 70 mPa · s。通过改变不同的砾石与地层砂组合(使用 GSR 表征)、驱替流量、泥质含量、流体黏度等条件变化进行驱替试验,模拟不同条件对堵塞程度和规律的影响机制。

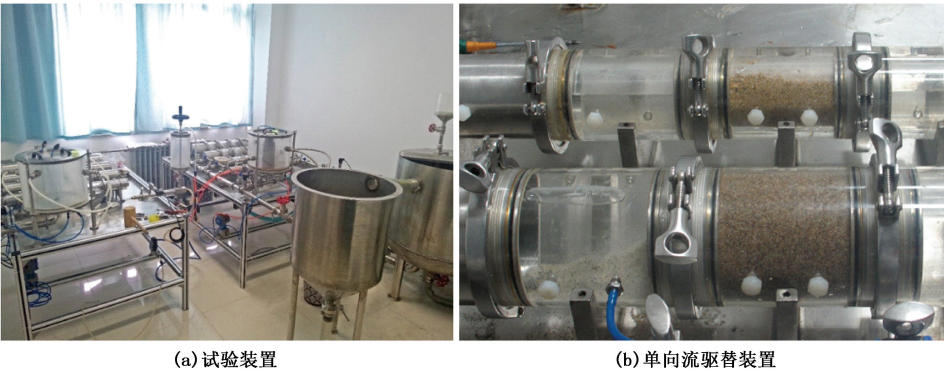


图 1 砾石层物理堵塞机制试验装置

Fig.1 Experimental apparatus of mechanical gravel plugging

1.3 试验结果分析

1.3.1 堵塞程度随时间的变化

分别使用清水和粒度中值 0.06、0.10 和 0.16 mm 的地层砂驱替粒径 0.42 ~ 0.84 mm 的砾石层,砾石层渗透率不再发生变化时停止驱替。在 3 个试验排量基本保持一致的情况下,测量得到渗透率比随时间的变化关系,如图 2 所示。

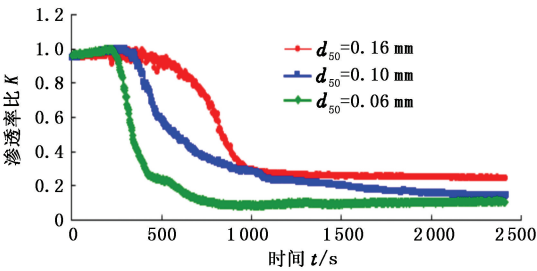


图 2 渗透率比随驱替时间的变化

Fig.2 Permeability ratio varying with flowing time by different sands

根据图 2,干净的砾石充填层在流体携带地层砂的流动冲击下,地层细砂逐步侵入砾石层形成物理堵塞,造成渗透率下降。并且在驱替早期渗透率迅速下降,之后下降速度减缓,最后趋于稳定。这表明砾石充填防砂井堵塞主要发生在防砂后投产早期,形成稳定桥架后,物理堵塞程度基本不再变化。

1.3.2 GSR 对堵塞程度的影响

对于粒径 0.42 ~ 0.84 mm 的砾石层,使用清水驱替粒度中值分别为 0.06、0.10 和 0.16 mm 的地层砂,对应的 GSR 分别为 10.5、6.3 和 3.93;使用 31 mPa · s 增黏液和粒度中值 0.095、0.124 mm 的地层砂分别驱替粒径 0.42 ~ 0.84、0.6 ~ 1.18 mm 的砾石层,对应 GSR 分别为 5.02、7.55 和 9.83。得到的最终堵塞渗透率比 (final plugging permeability ratio, FPPR) 随 GSR 的变化关系如图 3 所示。随着 GSR 增加,地层砂越细,越容易侵入砾石层并且最终的侵

入量越大,最终堵塞越严重,渗透率下降幅度越大。为了避免砾石层的过度堵塞,应谨慎根据地层砂粒度中值匹配合理的砾石尺寸,建议在 Saucier 提出的 GSR 为 5 ~ 6 的基础上适当降低。

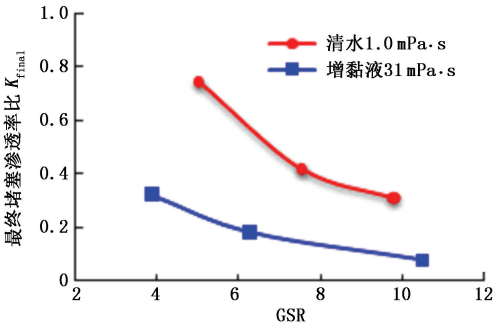


图 3 不同黏度下最终堵塞渗透率比随 GSR 的变化

Fig.3 FPPR varying with GSR by different fluid viscosity

1.3.3 流体黏度对堵塞程度的影响

使用粒度中值 0.1 和 0.16 mm 地层砂和不同黏度的流体驱替粒径 0.42 ~ 0.84 mm 的砾石层,测量最终的砾石层渗透率比,得到图 4 所示的堵塞渗透率比随流体黏度的变化曲线。从清水 1.0 mPa · s 开始,随着流体黏度增加,最终砾石层堵塞渗透率

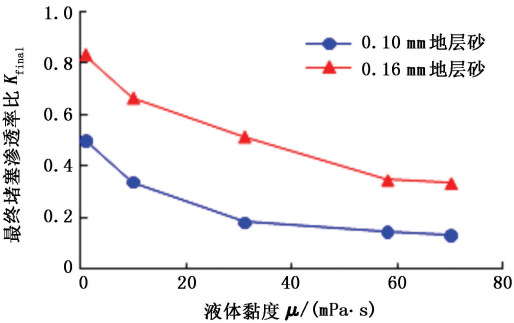


图 4 砾石层最终堵塞渗透率比随流体黏度的变化

Fig.4 FPPR varying with fluid viscosity by different sands

明显降低,这是因为高黏度的流体对地层砂的携带能力更强,更容易深入砾石层内部,形成较大幅度的

堵塞。试验过程中,随着黏度增加,试验泵频自动降低,流量和流速降低,流体对地层砂携带作用在流速方面减弱,部分抵消了流体黏度对侵入程度的影响。对于砾石充填油井,相同产量条件下,流体黏度较高的稠油井中挡砂介质的堵塞更严重。

1.3.4 驱替流量对堵塞程度的影响

使用粒度中值 0.1 mm 的地层砂和清水,在不同流量下驱替粒径 0.42 ~ 0.84 mm 的砾石层,侵入堵塞平衡后,得到砾石层最终渗透率比与驱替流量的关系如图 5 所示。结果表明,流速越大,流体携带地层砂能力越强,地层细砂越容易侵入砾石层造成堵塞,得到的最终渗透率比越低。对于砾石充填防砂井,在防砂后投产初期,为了避免过度侵入,应适当控制产量;达到堵塞平衡后再适当提高产量到配产。

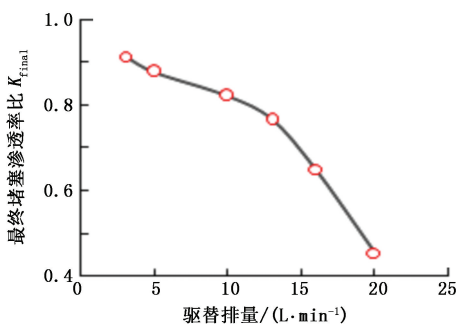


图 5 最终堵塞渗透率比随平均驱替流量的变化

Fig. 5 FPPR varying with average flowing rate

1.3.5 泥质含量对堵塞程度的影响

在地层砂中使用膨润土模拟黏土对砾石层堵塞规律的影响,在粒度中值 0.16 mm 的地层砂中掺入不同比例的膨润土,驱替粒径 0.42 ~ 0.84 mm 的砾石层,得到如图 6 所示的结果。黏土对砾石层的侵入与堵塞影响明显。当黏土含量升高为 7% ~ 10% 时,最终堵塞渗透率比明显降低;黏土含量越高,最终堵塞渗透率越低,堵塞程度越高。

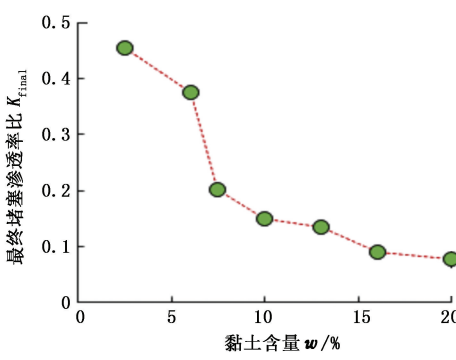


图 6 不同黏土含量下的最终堵塞渗透率比

Fig. 6 FPPR varying with different clay contents

1.3.6 原油沥青质对堵塞程度的影响

为了考察石英砂中沥青质和聚合物对堵塞的影响,使用清水携带粒度中值 0.16 mm 地层砂分别驱替粒径 0.42 ~ 0.84 mm 的干净砾石层和混有 5% 原油和聚合物的砾石层。测试得到的渗透率随时间的变化如图 7 所示。试验初始阶段吸附有原油和聚合物的砾石层渗透率约为干净砾石层的 60%;最终堵塞状态下,吸附有原油和聚合物的砾石层渗透率是干净砾石层的 25% 左右。这表明,如果砾石层中吸附原油和聚合物,不但本身渗透率会大幅降低,而且也会加剧地层砂在砾石层中的堵塞和渗透率伤害。

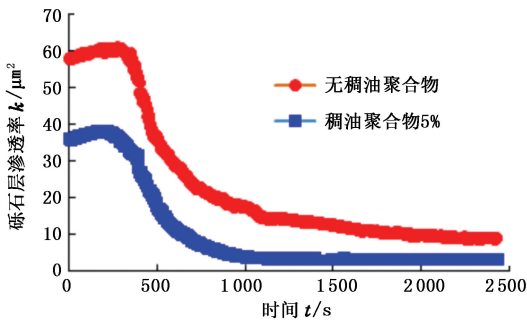


图 7 砾石层吸附原油与聚合物对堵塞过程的影响

Fig. 7 Effect of adsorbed heavy oil and polymer on gravel plugging process

1.4 砾石层物理堵塞机制

上述试验得到了石英砂物理堵塞过程的影响因素以及最终堵塞程度与影响因素的定性和定量关系,为进一步的堵塞程度预测提供了基础。根据不同驱替条件下的砾石层堵塞试验结果,总结砾石层物理堵塞机制如下:石英砂砾石层物理堵塞用堵塞周期和最终渗透率比表征,主要影响因素有 GSR、泥质含量、流体黏度、流体流速、生产时间、原油聚合物含量等。地层砂侵入并堵塞砾石层主要发生在驱替(防砂后投产)早期。砾石层渗透率迅速下降,然后变缓并趋于稳定;渗透率变化体现了地层砂侵入砾石层造成堵塞与桥架稳定过程。砾石层物理堵塞程度随着流体黏度增加、泥质含量升高、流量增大、聚合物留存而趋于严重。GSR 直接影响堵塞周期和最终堵塞程度,GSR 越大,堵塞越严重。

2 挡砂介质物理化学复合堵塞机制试验

为了进一步研究普通石英砂和树脂滤砂管挡砂层对地层砂、原油沥青质以及聚合物的吸附堵塞机制,通过对两者的物理化学性质测试分析,探究挡砂介质物理化学复合堵塞机制和规律。

2.1 堵塞物成分

从孤东油田注聚驱防砂井中取出的筛管堵塞物样品如图 8 所示。为了分析堵塞物成分,称取一定量的堵塞物,加入石油醚浸泡 2~3 次,分离出堵塞物中的饱和烃、芳香烃和胶质;加入苯浸泡 2~3 次,分离出堵塞物中的沥青质;加入蒸馏水分离出黏土、砂粒以及交联聚合物。结果表明,堵塞物中的主要组分是交联状聚合物,占 65.5%,其次是黏土和地层砂,占 17.8%,不含沥青质的原油组分占 12.4%,沥青质占 4.2%。采用 XRD 分析黏土和砂粒的组成,含有 36% 的石英(α - SiO_2)、17% 钾长石(KAlSi_3O_8)、40% 斜长石($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) 和 7% 黏土,主要成分均为 SiO_2 和硅酸盐类。



图 8 防砂油井中取出堵塞物样品

Fig. 8 Photograph of blockage sample removed from sand control well

2.2 普通石英砂与树脂涂敷砂吸附性能测试对比

根据堵塞物成分分析,注聚驱井堵塞物除了硅质地层砂外,其余主要成分为聚合物和沥青质。为了研究砾石充填层和树脂涂敷砂在堵塞过程中的堵塞程度差异产生的原因,从润湿性、沥青质吸附性能、聚合物吸附性能几个方面进行试验测试分析。

2.2.1 润湿性测试对比

强亲水物质对聚合物的吸附性能较好,因此可以通过测试普通石英砂和树脂涂敷砂的润湿性对比两者对聚合物的吸附性能。试验使用 Washburn 动态接触角测量法测量 0.3~0.6、0.42~0.84 和 0.6~1.18 mm 的石英砂和 0.42~0.84 mm 树脂涂敷砂的润湿性。将树脂涂敷砂与地层水混合,在 65℃ 下放置 2 d,则颗粒表面上的树脂发生化学反应,在砂粒表面形成一层树脂层,将黏结在一起的树脂涂敷砂分散开用于测试试验。测量试验时间 t 内的液面上升高度 h ,根据 Washburn 方程作出 $h^2 \sim t$ 的关系曲线,求得斜率,反映材料的润湿性能。

$$h^2 = \frac{-\gamma r t \cos \theta}{2\mu} \quad (1)$$

式中, γ 为液体表面张力; r 为颗粒等效毛细半径; μ 为液体黏度; θ 为润湿角,rad。

测试得到 4 种材料的 $h^2 \sim t$ 的关系如图 9 所示。分析可知,水在砂柱中的上升速度由快到慢依次为 0.3~0.6 mm 石英砂、0.42~0.84 mm 石英砂、0.6~1.18 mm 石英砂、0.42~0.84 mm 树脂涂敷砂。3 种粒径的普通石英砂在地层水的条件下强亲水;树脂涂敷砂在地层水的条件下弱亲水,液面上升 2 cm 的高度需要 24 h,而对于普通石英砂则只需要 50 s。亲水性越强,对原油、交联聚合物和胶质沥青质的吸附能力越强。对于石英砂,颗粒粒径越小,毛细管半径越小,毛管力越大,因而上升速度快。

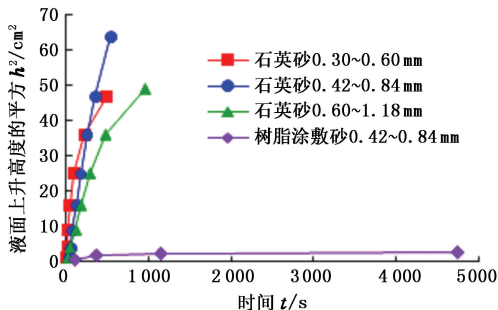


图 9 不同挡砂介质润湿性测试结果

Fig. 9 Result of wettability of gravel and resin-caoted gravel

2.2.2 对沥青质吸附性能测试对比

油藏岩石或挡砂介质对沥青质的吸附是造成储层损害导致产能下降的重要原因之一。原油沥青质的吸附使其润湿性从亲水向亲油方向改变,造成储层岩石的油相相对渗透率下降;同时,沥青质在孔隙表面的沉积还会导致有机垢的形成,造成储层孔喉堵塞。为了研究挡砂介质吸附沥青质堵塞机制,对沥青质在普通石英砂和树脂涂敷砂上的吸附量进行试验测试。

沥青质是原油中不溶于石油醚的极性组分,将原油与足够量的石油醚相混合,在 20℃ 下充分搅拌,再经过滤、洗涤,并在 60℃ 干燥,即可分离出原油中的沥青质。试验测得所提供原油样品中沥青质的含量为 1.43%。使用 0.3~0.6、0.42~0.84 和 0.6~1.18 mm 粒径的石英砂和 0.42~0.84 mm 的树脂涂敷砂在液体中浸泡。浸泡液一种为纯原油,另一种为含水率 50% 的原油,水中聚合物浓度为 2 g/L。试验时取 50 g 的 3 种石英砂和树脂涂敷砂,在 65℃ 与 100 g 液体(固液质量比为 1:2)接触 4 d 后,分离固体颗粒表面上的原油和沥青质,计算沥青质的吸附量。

试验采用两种液体,其目的是分析对比聚合物存在时对沥青质吸附量的影响。表 1 为沥青质在挡砂介质上的吸附量测试结果,图 10 为沥青质在石英砂表面的吸附照片,可以明显看出沥青质在石英砂表面具有较强的吸附性。

表 1 沥青质在普通石英砂和树脂涂敷砂表面吸附量
Table 1 Asphaltene adsorption on gravel and resin-coated gravel

颗粒种类	沥青质吸附量(沥青质/砂粒质量)/%	
	原油 (无聚合物)	原油+地层水 (1:1,有聚合物)
0.6~1.18 mm 石英砂	0.0084	0.0104
0.42~0.84 mm 石英砂	0.0096	0.0138
0.3~0.6 mm 石英砂	0.0112	0.0151
0.42~0.84 mm 树脂涂敷砂	0.0026	0.0044

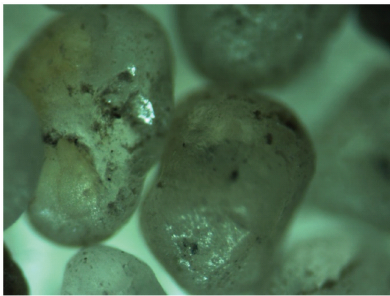


图 10 沥青质在石英砂(0.42~0.84 mm)上的吸附显微照片
Fig. 10 Micro-photograph of asphaltene adsorbed on gravel(0.42~0.84 mm)

分析表 1 的测试结果可知,沥青质在石英砂和树脂涂敷砂颗粒表面都存在吸附,但沥青质在石英砂颗粒表面上的吸附量远大于树脂涂敷砂。因沥青质的吸附量低,沥青质吸附对树脂防砂管的伤害较低。对于充填石英砂,颗粒直径越小,比表面积越大,对沥青质的吸附能力越强。对于强亲水充填砂,首先造成聚合物在颗粒表面吸附,导致沥青质的吸附量大,即聚合物的存在增加了充填砂表面沥青质的吸附量。

2.2.3 聚合物在挡砂介质表面吸附测试对比

使用淀粉-碘化镉光度法测定聚合物在挡砂介质表面的吸附量。测试原理为部分水解聚丙烯酰胺(HPAM)与溴水反应生成溴代酰胺,以甲酸钠为还原剂除去过量的溴,溴代酰胺在酸性条件下(pH=5.0)与淀粉-碘化镉发生氧化还原反应生成蓝色 I3-淀粉络合物,溶液的吸光度与 HPAM 的质量浓度成正比。

分别取 50 g 粒径 0.42~0.84 mm 石英砂和 0.42~0.84 mm 树脂涂敷砂以及地层砂,在 65 ℃下

与 100 g 浓度分别为 2 和 5 g/L 的 HPAM 溶液(固液比为 1:2)接触 1~9 d。测定不同浓度 HPAM 溶液在颗粒表面吸附后溶液的吸光度,计算聚合物的吸附量,结果如图 11 所示。结果表明,聚合物在普通石英砂表面的吸附量远高于树脂涂敷砂和地层砂,普通石英砂对聚合物的吸附量约为树脂涂敷砂的 2.5 倍。

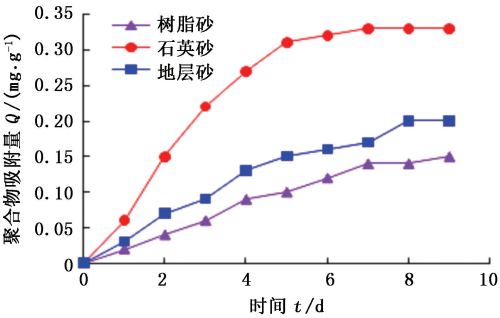


图 11 不同介质对聚合物吸附量测试结果
Fig. 11 Test results of polymer adsorption on different media surface

图 12 为不同浓度 HPAM 聚合物对 0.42~0.84 mm 普通石英砂的吸附量测试结果。在一定浓度范围内,HPAM 浓度增大,普通石英砂对其吸附量增大。这是由于随着浓度的增加,单位体积聚合物量增多,单位质量石英砂所接触的 HPAM 绝对量增大,吸附量增大。试验结果表明,对于注聚驱防砂井,到达油井的聚合物浓度是影响挡砂介质吸附堵塞的重要因素。

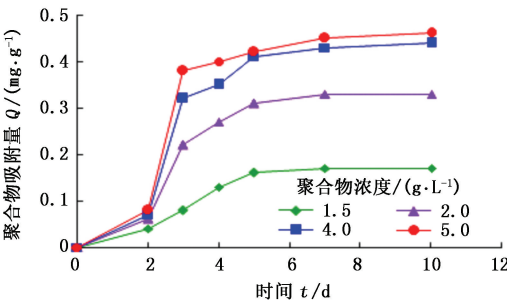


图 12 不同浓度聚合物在 0.42~0.84 mm 石英砂的吸附量测试结果
Fig. 12 Test results of polymer adsorption on 0.42~0.84 mm gravel with different concentration

图 13 为浓度 2 g/L 聚合物在不同粒径石英砂表面的吸附量测试结果。试验结果表明,在一定 HPAM 浓度下,石英砂粒径越小,比表面越大,吸附量越大。降低砾石尺寸有利于挡砂,但较细砾石对于聚合物驱防砂井会造成较大的聚合物吸附堵塞。

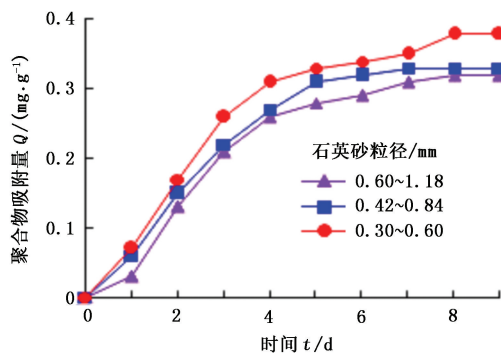


图13 浓度2 g/L聚合物在对不同粒径石英砂表面吸附量测试结果

Fig. 13 Test results of 2 g/L polymer adsorption on gravel with different size

3 挡砂介质物理化学复合堵塞机制

综合上述试验结果,总结孤东油田注聚驱防砂井砾石充填防砂和树脂滤砂管防砂物理化学复合堵塞规律和机制如下:

(1) 物理化学复合堵塞和挡砂介质表面的润湿性、吸附性能有关。与树脂涂敷砂相比,石英砂充填层表面强亲水,其对聚合物及其衍生物和沥青质的表面吸附量远高于高渗滤涂敷砂。原本高孔高渗的石英砂充填层复合堵塞后的渗透率反而远低于高渗滤砂管,造成砾石充填防砂井提液效果较差。

(2) HPAM 在石英砂粒表面的吸附量随时间的增加而逐渐增加,而且随着时间增加吸附量趋于平稳。在相同聚合物浓度下,石英砂粒径越小,吸附量越大。

(3) 在水悬浮体系中,HPAM 与二氧化硅之间存在氢键作用,易在二氧化硅表面吸附。小粒径的 SiO_2 由于比表面较大,且表面原子配位不足,吸附强于普通的 SiO_2 。HPAM 含有 C-O、C-H、C-N 和 N-H 等强极性键, SiO_2 与这些强极性键容易通过氢键、范德华力、偶极子的弱静电引力产生吸附,由于 SiO_2 表面的氢氧根与 HPAM 结构中的 O 原子之间存在氢键,因此氢键的形成成为吸附的主要原因,HPAM 与小粒径的 SiO_2 表面羟基可通过氢键结合而形成吸附层。

(4) HPAM 大分子的分子链在 SiO_2 颗粒表面构型发生变化是导致 HPAM 吸附量随着各种因素发生变化的根本原因。当浓度升高时,吸附在胶体颗粒表面的 HPAM 在空间位阻和分子间力影响下,空间结构由链节式向环式和尾式构型转化,吸附层厚度也随之增大,在一定范围内浓度越高,吸附量越

大。

(5) 当 HPAM 浓度为 2 g/L 时,石英砂的吸附量是树脂涂敷砂的吸附量的 2.2 倍;HPAM 浓度为 5 g/L 时,石英砂的吸附量约为树脂涂敷砂的 2.5 倍。这是由于树脂涂敷砂表层树脂改变了颗粒表面的性质,使其对 HPAM 的吸附量降低。

4 结 论

(1) 注聚驱防砂井近井地带堵塞不仅是机械颗粒对挡砂多孔介质的物理堵塞,而是涉及原油和聚合物的物理化学复合堵塞的综合作用。

(2) 物理堵塞周期和最终渗透率比的主要影响因素有 GSR、泥质含量、流体黏度、流体流速、生产时间、聚合物含量等。地层砂侵入并堵塞砾石层主要发生在驱替(防砂后投产)早期。砾石层渗透率迅速下降,然后变缓并趋于稳定。砾石层物理堵塞程度随着流体黏度增加、泥质含量升高、流量增大、聚合物留存而趋于严重。GSR 直接影响堵塞周期和最终堵塞程度,GSR 越大,堵塞越严重。

(3) 物理化学复合堵塞和挡砂介质表面的润湿性、吸附性能有关。与树脂涂敷砂相比,石英砂充填层表面强亲水,其对聚合物及其衍生物和沥青质的表面吸附量远高于高渗滤涂敷砂。HPAM 在石英砂粒表面的吸附量随时间的增加而逐渐增加,而且随着时间增加吸附量趋于平稳。在相同聚合物浓度下,石英砂粒径越小,吸附量越大。原本高孔高渗的石英砂充填层复合堵塞后的渗透率反而远低于高渗滤砂管,造成砾石充填防砂井提液效果较差。

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.
- [2] 董长银, 李志芬, 张琪. 基于油井流入动态曲线的防砂井产能预测研究[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(3): 58-60.
DONG Changyin, LI Zhifen, ZHANG Qi. A new productivity prediction model for sand control wells based on IPR curve[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001, 29(3): 58-60.
- [3] 董长银, 李志芬, 张琪, 等. 防砂井产能评价及预测方法[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(6): 45-48.
DONG Changyin, LI Zhifen, ZHANG Qi, et al. Integrated model for sand control well productivity evaluation and prediction[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2002, 24(6): 45-48.

- [4] 董长银,饶鹏,冯胜利,等. 高压砾石充填防砂气井产能预测与评价[J]. 石油钻采工艺, 2005,27(3):54-57.
DONG Changyin, RAO Peng, FENG Shengli, et al. Integrated productivity model for gas well with high-pressure gravel-pack sand control[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005,27(3):54-57.
- [5] AHSENE B. A study of particulates migration in gravel pack[R]. SPE 27346, 1994.
- [6] 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.
- [7] 王志刚,李爱芬,张红玲,等. 砾石充填防砂井砾石层堵塞机制实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000,24(5):49-51.
WANG Zhigang, LI Aifen, ZHANG Hongling, et al. 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.
- [8] 胡才志,裴柏林,李相方,等. 砾石充填井堵塞机制实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004,28(3):40-42.
HU Caizhi, PEI Bolin, LI Xiangfang, 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.
- [9] 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 Chengshi, 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.
- [10] 董长银,贾碧霞,刘春苗,等. 机械防砂筛管挡砂介质堵塞机制及堵塞规律试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011,35(5):82-88.
DONG Changyin, JIA Bixia, LIU Chunmiao, et al. Blocking mechanism and blocking laws experiments of sand retention media in mechanical screens[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011,35(5):82-88.
- [11] 伍泰荣,黎有炎,王海峰,等. 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 Tairong, LI Youyan, WANG Haifeng, et al. Lab test on reservoir choke caused by organic scale[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004,32(5):59-61.
- [12] 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 Liqiang, SONG Aili, et al. Plugging analysis of polymer injection wells in Bohai SZ36-1 Oil-field[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology, 2010,12(5):35-37.
- [13] 关德,杨寨,张勇,等. 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, YANG Zhai, ZHANG Yong, et al. 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.
- [14] 张贤松,孙福街,冯国智,等. 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 Xiansong, SUN Fujie, FENG Guozhi, et al. A research on influence factors of polymer flooding and its field testing in Bohai heavy oil fields[J]. China Off-shore Oil and Gas, 2007,19(1):30-32.
- [15] 薄启炜,董长银,张琪,等. 砾石充填层孔喉结构可视化模拟[J]. 石油勘探与开发, 2003,30(4):108-110.
BO Qiwei, DONG Changyin, ZHANG Qi, et al. Visual simulation of porous structure in packed gravels[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003,30(4):108-110.

(编辑 李志芬)