

# 稠油热采井含油污泥调剖技术研究与应用\*

杨 洋<sup>1</sup> 王 哲<sup>2</sup> 郑赛男<sup>3</sup> 魏 巍<sup>3</sup>

(1. 中国石油辽河油田公司曙光采油厂; 2. 中国石油润滑油公司; 3. 中国石油辽河油田公司质量安全环保部)

**摘 要** 以稠油开发为主的曙光油田进入中后期开采阶段后,随着含水率升高,集输和污水处理系统中含油污泥产出量增大,稠油含油污泥处理困难、成本高。针对该问题,结合稠油蒸汽吞吐中动用不均、汽窜等开发矛盾,在含油污泥组分分析的基础上,深入封堵机理研究,以含油污泥为主要原料研制含油污泥调剖系列堵剂,配套设计段塞组合、施工工艺、地面流程及专用设备,用于稠油热采井的调剖封窜。实际应用表明,该技术可有效动用中低渗透层、缓解汽窜,在改善开发效果的同时实现含油污泥的绿色资源化利用,节约含油污泥处理成本,具有广阔的应用前景。

**关键词** 曙光油田; 稠油; 含油污泥; 调剖; 蒸汽吞吐

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2020.04.010

文章编号: 1005-3158(2020)04-0035-05

## 0 引 言

曙光油田是国内重要的稠油热采生产基地,目前已进入中后期高含水开发阶段,其集输和污水处理系统日产含油污泥约 350 t,缺乏高效低成本的处理手段,储存能力已达极限。稠油含油污泥成分复杂、分离困难,含有苯类、酚类、萘类等物质,会对环境造成污染<sup>[1-4]</sup>,且含油污泥含有泥质、原油,无论从环境保护还是从资源回收的角度考虑,都亟需研究一种行之有效的处理技术对含油污泥进行减量化、资源化、无害化处理<sup>[5-10]</sup>。目前国内外含油污泥处理主要有焚烧法、热洗法、生物处理法、溶剂萃取法等,但普遍存在处理成本高、效率低、二次污染的问题,难以满足企业的实际需求,简化工艺流程、降低处理成本、满足环保要求是含油污泥处理技术的发展方向。稠油含油污泥中的固体成分对高渗储层具有物理堵塞作用<sup>[11-12]</sup>,具有颗粒调剖的可行性。曙光稠油油藏非均质性强,经过多年热采开发,油层动用不均、汽窜问题严重,年均调剖措施规模大、投入高,含油污泥调剖技术是降低措施成本、解决含油污泥处理难题的有效途径。

## 1 含油污泥组分分析及特性评价

### 1.1 组分及含量

曙光采油厂含油污泥主要来自污水处理系统,成分较为复杂,大致分为水相、油相和固相,不同来源的含油污泥各组分含量差别较大。分别取底泥、浮渣、活性污泥 3 种含油污泥,用蒸馏灼烧法测定其组分及含量,结果见表 1。

表 1 污水处理厂含油污泥组分分析

| 样品   | 水相含量/% | 固相含量/% | 油相含量/% | 样品外观   |
|------|--------|--------|--------|--------|
| 底泥   | 61.86  | 22.69  | 15.45  | 黑色油砂   |
| 浮渣   | 61.34  | 20.41  | 18.25  | 黑色黏稠液体 |
| 活性污泥 | 75.47  | 14.63  | 9.90   | 黑色黏稠液体 |

样品固相含量 14.63%~22.69%,浮渣、底泥固相含量较高,常规颗粒调剖剂中固相含量通常为 10%~30%,样品具有制成颗粒调剖剂的可行性;含水均超过 50%,泵送性良好;活性污泥固相含量稍低,需在体系中添加一定量固相成分,增加其封堵强度<sup>[13]</sup>。激光粒度仪对含油污泥固相成分粒度分布测定结果见图 1。

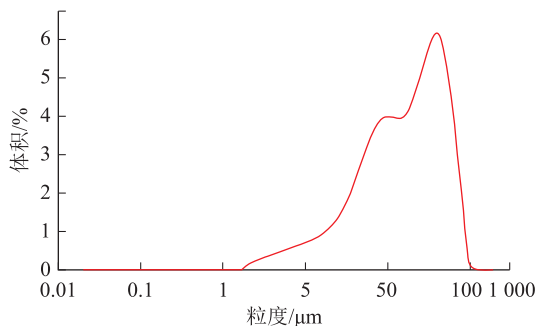


图 1 含油污泥固相成分粒度分布曲线

图 1 显示,其粒度主要在 10~100  $\mu\text{m}$ ,以中小颗粒为主,且分布较均匀,粒径最频值为 5~100  $\mu\text{m}$ ,约占 80%。调剖用颗粒粒径一般要求为孔隙喉径的

\* 基金项目: 中国石油天然气集团公司重大科技专项(2016E-1205)。

杨洋,2010 年毕业于西南石油大学勘查技术与工程专业,硕士,现在中国石油辽河油田公司曙光采油厂从事采油工艺技术研究及推广工作。通信地址: 辽宁省盘锦市兴隆台区曙光街曙光采油厂工艺研究所,124109。E-mail: yangyang08@petrochina.com.cn。

1/9~1/3,稠油油藏高渗透层孔喉半径经过多轮蒸汽吞吐后,一般在 200~500  $\mu\text{m}$ ,因此含油污泥固相粒径与地层配伍性良好,满足孔隙喉径的要求。

1.2 分散悬浮性

颗粒调剖剂须具备良好的悬浮性能,避免在输送至目的层过程中出现沉降,影响后续注入。将样品按不同掺水比例稀释后,观察其分散性、悬浮稳定性,含油污泥分散悬浮状态结果见表 2。

表 2 含油污泥分散悬浮状态

| 样品   | 掺水比例/% | 120 min 脱水/mL | 脱水率/% | 悬浮状态  |
|------|--------|---------------|-------|-------|
| 底泥   | 70     | 5             | 17.2  | 少量分层  |
|      | 50     | 2             | 6.9   | 基本不分层 |
|      | 30     | 0             | 0     | 不分层   |
| 浮渣   | 70     | 2.5           | 8.1   | 基本不分层 |
|      | 50     | 0             | 0     | 不分层   |
|      | 30     | 0             | 0     | 不分层   |
| 活性污泥 | 70     | 0             | 0     | 不分层   |
|      | 50     | 0             | 0     | 不分层   |
|      | 30     | 0             | 0     | 不分层   |

实验结果表明,活性污泥稳定性最好,稀释后不分层,可单独作为调剖剂使用;浮渣和底泥由于固相成分含量较高,掺水比例较高时,会出现分层,需要加入一定量的稠化剂,提高悬砂性能及稳定性,以满足现场施工要求<sup>[14]</sup>。

1.3 流动性

为保证调剖剂正常流动及管输,其黏度需 $\leq 600\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。将样品按不同掺水比例稀释后测定其黏度,结果见图 2。当各类含油污泥掺水率达到 75%以上,黏度 $<600\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,具有较好的流动性,能够顺利泵入地层。但是含水率过高,会造成含油污泥固相

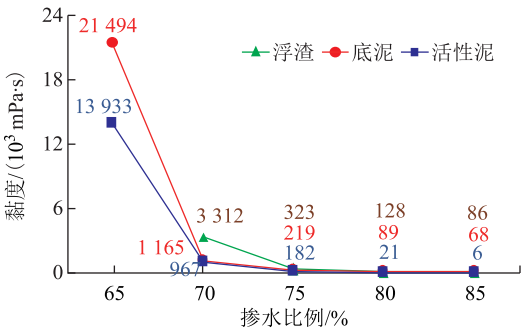


图 2 不同掺水比例含油污泥黏度曲线

含量和黏度下降,影响其封堵能力,所以在现场使用时,需要控制含油污泥含水率为 75%~80%。

2 含油污泥封堵效果模拟评价

组分及特性分析表明,含油污泥具备制成调剖剂的可行性,通过物理模型与数值模拟对含油污泥封堵机理进行研究。

2.1 物模实验

将实际地层砂筛析后制成不同渗透率级别填砂管模型,注入 1.0 PV 含油污泥。

单填砂管封堵实验(1 PV)结果见表 3;串联填砂管封堵实验(1 PV)结果见表 4。实验表明,不同含水率含油污泥在不同温度下对 3 000~4 000 mD 填砂模型的封堵率均超过 98%,含水率和温度对效果影响不大;串联填砂管模型封堵实验表明,当两个填砂管串联注入 1 PV 含油污泥时,前填砂管封堵率达到 99.90%,后填砂管封堵率仅 25.13%,产出液为清澈的水。

表 3 单填砂管封堵实验(1 PV)

| 温度/<br>℃ | 堵前渗透率/mD | 堵后渗透率/mD | 封堵率/% | 阻力因子      | 残余阻力因子   |
|----------|----------|----------|-------|-----------|----------|
| 40       | 3 290    | 2        | 99.94 | 10 352.22 | 1 645.00 |
| 60       | 3 472    | 2        | 99.94 | 9 419.98  | 1 736.00 |
| 80       | 3 231    | 3        | 99.87 | 5 503.92  | 807.75   |
| 100      | 3 166    | 30       | 99.05 | 3 185.99  | 105.53   |
| 120      | 2 991    | 33       | 98.89 | 1 054.87  | 90.64    |

表 4 串联填砂管封堵实验(1 PV)

| 编号 | 堵前渗透率/mD | 堵后渗透率/mD | 封堵率/% | 阻力因子     | 残余阻力因子 |
|----|----------|----------|-------|----------|--------|
| 1  | 2 915    | 3        | 99.90 | 3 433.26 | 971.67 |
| 2  | 3 498    | 2 993    | 25.13 | —        | —      |

2.2 数值模拟

以曙光油田曙 D1 油藏作为目标油藏,开展热采井含油污泥调堵数值模拟,以 CMG 公司稠油热采油藏模拟模块 STARS 为模拟器建立数值模型,并考虑蒸汽吞吐后油藏物性变化。模拟含油污泥以流体形式注入过程中,流向高渗区域,经过多孔介质时固相和油质会与水相分离,起到堵塞作用。蒸汽吞吐热采一轮油藏注入 1 400  $\text{m}^3$  含水 80%含油污泥后地层渗透率变化见图 3。

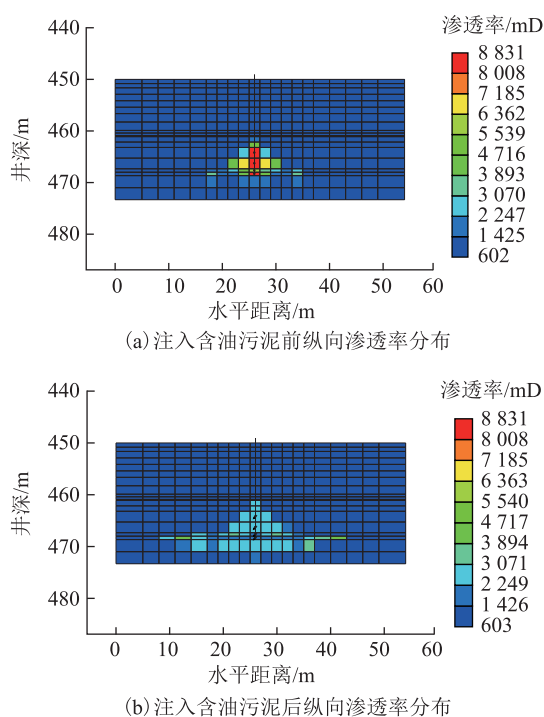


图3 注入含油污泥前后纵向渗透率变化

由图3可知,调剖后高渗区渗透率降低约70%,油藏渗透率分布更均匀,有助于改善吸汽剖面和动用状况。

### 2.3 机理分析

注入含油污泥通过砂样介质时,含油污泥中水与油、泥质发生分离,泥质和油在孔隙介质中吸附滞留,产生封堵效果;数值模拟显示,注入含油污泥可明显降低高渗区或出砂产生空洞区域的渗透率,使得油藏渗透率分布更加均匀,有助于改善蒸汽吞吐的吸汽剖面和油藏动用状况。

## 3 含油污泥调剖技术研究

### 3.1 含油污泥调剖剂研制

稠油油藏经过长期蒸汽吞吐,其孔隙度、渗透率等地层参数与原始状况已有很大差别,需针对不同含

油污泥加入适合的改性化学剂和添加剂,制成有一定强度和耐冲刷能力的调剖剂。

#### 1) 含油污泥颗粒调剖剂

以污水厂活性污泥为原料,混配含量75%~85%,并加入一定量悬浮剂和分散剂,同时,添加合适种类和大小的固相颗粒,提高封堵强度。悬浮剂为与含油污泥配伍性较好,具有一定触变性的钠基膨润土,能保持体系有较高悬浮性和强度;固相颗粒选择200目以上有一定膨胀系数的树脂颗粒,产生桥架作用,对孔道进行封堵;分散剂为一种有机电解质,主要是降低含油污泥调堵剂的界面张力,防止形成油、泥、水聚集体。该体系悬浮性>8h,封堵率50%~90%。

#### 2) 含油污泥聚合物复合调剖剂

配方主要成分为底泥,混配含量60%~80%,并加入适量聚丙烯酰胺及絮凝剂,利用含油污泥微粒表面—OH基团与聚丙烯酰胺分子的一NH<sub>2</sub>基团结合形成氢键,大量氢键作用使聚合物能稳定地吸附在含油污泥微粒表面,使含油污泥絮凝成更大的颗粒,从而产生封堵作用。体系成胶时间12~24h,黏度80~500 mPa·s,耐温>200℃。

#### 3) 含油污泥改性高温封口剂

以固相含量较高的浮渣为主料,混配含量50%~62%,并加入无机凝胶、固化剂、增强剂、活化剂、悬浮剂等,按适当比例复配而成。通过控制反应温度和活化剂用量,调节成胶速度和强度。体系在成胶前黏度低,利于泵注;成胶后,强度高,耐温性好,能满足热采条件下耐热、耐冲刷要求,并长期有效。体系封堵率≥95%,突破压力>20 MPa,耐温超过300℃。

### 3.2 调剖剂封堵性能评价

含油污泥调剖剂应用于稠油热采井,对耐温、耐冲刷、封堵强度要求较高,在室内采用填砂管模型(300℃)进行封堵实验,结果见表5。

表5 含油污泥调剖剂封堵率实验数据

| 调剖剂类型        | 堵前渗透率/<br>10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> | 堵后渗透率/<br>10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> | 突破压力/<br>MPa | 封堵率/<br>% | 残余阻力<br>系数 |
|--------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|-----------|------------|
| 含油污泥颗粒调剖剂    | 2.128                                      | 0.251                                      | 11.5         | 88.2      | 9.3        |
| 含油污泥聚合物复合调剖剂 | 2.174                                      | 0.526                                      | 7.5          | 75.8      | 6.2        |
| 含油污泥改性高温封口剂  | 2.156                                      | 0.103                                      | 22.4         | 95.2      | 22.4       |

实验表明,3种含油污泥调剖剂岩心封堵率75.8%~95.2%,可通过段塞优化组合满足不同类型储层封堵需求。

### 3.3 调剖方案设计优化

采用CMG油藏模拟软件进行稠油热采井含油污泥调剖数值模拟,模拟结果用来指导含油污

泥调剖方案设计。处理半径取 1~10 m,模拟计算不同剂量下封堵效果。不同热采轮次调剖数值模拟结果见图 4;不同非均质系数调剖数值模拟结果见图 5。

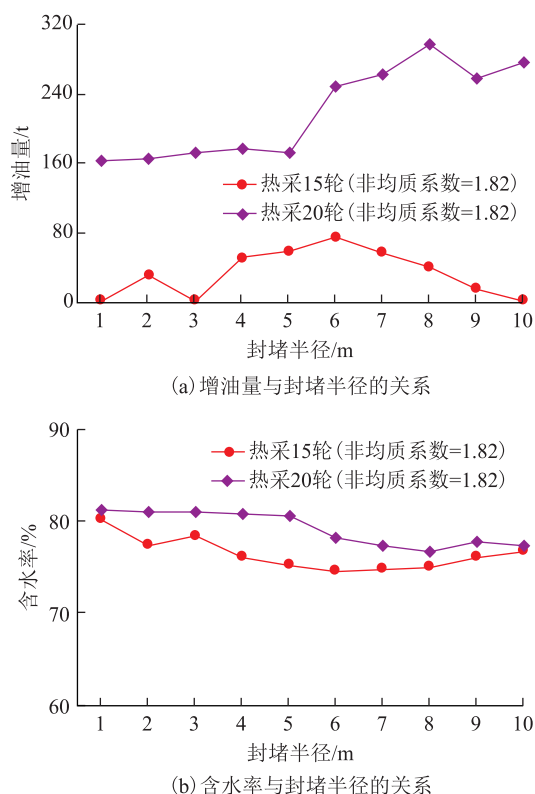


图 4 不同热采轮次调剖数值模拟结果

由图 4 可以看出,对非均质系数 1.82 的模型,生产 15 周期时进行封堵,封堵后周期增油量最高 75 t;生产 20 周期时进行封堵,封堵后周期增油量最高为 297 t,最优封堵半径 8 m。对于非均质系数为 1.90, 1.94 和 1.95 的 3 个模型,同样第 20 周期封堵效果好于 15 周期。

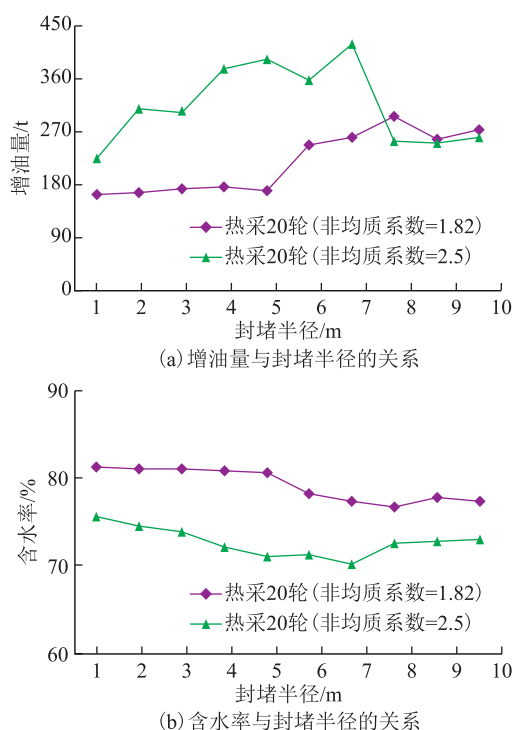


图 5 不同非均质系数调剖数值模拟结果

图 5 显示,封堵后原油产量上升,含水量下降,周期增油量并非简单地随封堵半径的增大而增多,而是存在一个最优的封堵半径。对于非均质系数为 2.5 的模型,最优封堵半径为 7 m,封堵后的周期含水率为 70.3%,对比下降 10%。

综合数值模拟结果,认为油层渗透率变异系数越大,含油污泥调剖效果越好;针对稠油高渗透油藏,最佳调剖半径约 7~8 m,最佳封堵时机>20 轮。

### 3.4 调剖段塞组合优化

针对不同稠油区块地质状况和开发矛盾,结合不同含油污泥调剖剂的性能进行段塞最优组合,目前现场实践了 3 种段塞组合方式的实施工艺,结果见表 6。

表 6 含油污泥调剖技术施工工艺及段塞组合

| 施工工艺      | 适用油藏                  | 段塞组合                                 | 压力/MPa | 目的                  |
|-----------|-----------------------|--------------------------------------|--------|---------------------|
| 高强度含油污泥调剖 | 吸汽不均、汽窜严重的高渗超稠油油藏     | 含油污泥聚合物调剖剂+大颗粒+含油污泥颗粒调剖剂+含油污泥改性高温封口剂 | 13~15  | 封堵高渗层汽窜通道,启动中、低渗透层。 |
| 常规含油污泥调剖  | 吸汽不均、汽窜稍弱的中低渗稠油、超稠油油藏 | 含油污泥颗粒调剖剂+含油污泥聚合物调剖剂+含油污泥改性高温封口剂     | 10~12  | 调整吸汽剖面,提高动用程度。      |
| 大剂量含油污泥调剖 | 地层亏空严重、注汽压力较低的稠油油藏    | 含油污泥+中细颗粒+含油污泥改性高温封口剂                | 8~12   | 补充地层能量,提高注汽压力。      |

1)高强度含油污泥调剖工艺:主要针对井距较小、汽窜严重的超稠油油藏,以封堵汽窜通道、调整吸汽剖面为主要目的。前段塞采用强度较大的含油污

泥聚合物体系+大颗粒对该井油层进行“建墙”处理,建立前沿封堵强度;第二段塞采用含油污泥颗粒体系进行“填缝处理”,填充高渗透层中远端细小地层孔



喉;第三段塞使用含油污泥高温封口剂,体系固化后形成耐高温蒸汽冲刷的保护段塞。

2)常规含油污泥调剖工艺:主要针对吸汽不均、汽窜相对较轻的稠油、超稠油油藏,以改善吸汽剖面为主要目的。采用含油污泥+微细颗粒作为前置段塞,进入地层深部起到保护后续段塞的作用;含油污泥凝胶调剖剂中间段塞,起到推送、加强封堵的作用;最后以含油污泥高温封口剂封口。

3)大剂量含油污泥调剖工艺:主要针对地层亏空严重、注汽压力较低的普通稠油油藏,以补充地层能量为主。以含油污泥+中细颗粒作为主段塞,剂量大于 $5\,000\text{ m}^3$ ,含油污泥封口剂封口。

#### 4 现场应用效果

在理论研究及室内实验基础上,在曙光油田D1区块进行含油污泥调剖现场试验。试验油藏储层物性好,高孔、高渗,平均渗透率为 $2.37\text{ }\mu\text{m}^2$ ,有效孔隙度32.6%,汽窜、动用不均严重,适合开展含油污泥调剖。

##### 4.1 应用效果

含油污泥调剖技术现场应用32井次,累计使用含油污泥原料 $9.34\times 10^4\text{ t}$ 。与措施前对比,实施井注汽压力平均提高2.6 MPa、增油6 849 t,汽窜方向减少43个、汽窜影响产量降低4 338 t;与常规凝胶类调剖技术相比,单井投入减少6.7万元,单井增油增加106 t,技术优势明显。

##### 4.2 经济效益

按辽河油田常规含油污泥处理费用1 000元/t、含油污泥调剖技术综合成本480元/t计算,处理含油污泥 $9.34\times 10^4\text{ t}$ ,节约处理费用 $4\,856.8\times 10^4$ 元;按稠油价格850元/t计算,措施增油6 849 t,增油创效 $582.1\times 10^4$ 元,经济效益显著。

##### 4.3 典型实例

D1-1井措施前已热采25轮,注汽压力10.7 MPa,周期生产仅57 d,产油205 t,与周边两口井汽窜严重。该井实施高强度含油污泥调剖技术,注入含油污泥 $852\text{ m}^3$ 。措施后注汽压力14.2 MPa,对比提高3.5 MPa;周期生产136 d,产油523 t,对比增油318 t;注汽期间周边未出现明显汽窜反应,调剖后封窜增油效果明显。

#### 5 结束语

1)结合曙光油田油藏实际,通过组分及特性分析

证明含油污泥具有颗粒调剖的可行性,其封堵机理是吸附、滞留为主的物理堵塞作用。

2)以含油污泥为主要原料研制的调剖剂体系,其封堵率75.8%~95.2%,通过不同的段塞组合能满足中、低渗透油藏调剖封窜需求。

3)实际应用表明,含油污泥调剖技术具有良好的封窜、增油效果,且施工简单、成本低,可扩展应用于火驱、SAGD(蒸汽辅助重力泄油技术)、水驱等开发领域。

4)含油污泥调剖技术的成功应用,在改善稠油油藏热采开发效果的同时,实现了含油污泥的绿色、低成本、资源化利用。

#### 参考文献

- [1] 胡华龙,韩梅,黄秉禾,等.利用石化污泥生产新型除油吸附剂的实验研究[J].交通环保,2001,22(4):12.
- [2] 黄玲,高荔,党博,等.油田污油泥产生途径及处理方法[J].油气田地面工程,2010,29(2):75-76.
- [3] 刘东明.风城油田超稠油SAGD采出液高温密闭脱水技术[J].东北石油大学学报,2014,38(3):87-93.
- [4] 张莉,刘慧卿,陈晓彦.非均相复合驱封堵调剖性能及矿场试验[J].东北石油大学学报,2014,38(1):63-68.
- [5] 任皓.油井堵水技术进展[J].钻井液与完井液,1993,10(6):1-10.
- [6] 赵福麟.黑液体系驱油研究[J].石油学报,1995,16(1):53-60.
- [7] 尚宏志.CYY-II凝胶型调剖剂强度影响因素及应用效果[J].东北石油大学学报,2014,38(2):91-96.
- [8] 任成锋.喇嘛甸油田低成本沥青颗粒调剖技术[J].东北石油大学学报,2014,38(3):81-86.
- [9] 高思远.大庆油田二类油层交联聚合物微球调剖剂性能[J].大庆石油地质与开发,2013,32(4):112-116.
- [10] 冯有奎,唐颖,闫伟,等.疏松砂岩稠油油藏调剖试验效果评价[J].油气地质与采收率,2015,22(3):124-128.
- [11] 王小泉,马宝岐.调整蒸汽注入剖面用的高温堵剂[J].油田化学,1991,8(1):74-78.
- [12] 李凡修.污油泥无害化处理及综合利用的途径[J].油气田环境保护,1998,8(3):42-44.
- [13] 尤俊洪.一种处理污泥的方法:816001176[P].1987-01-24.
- [14] 张秀霞,耿春香,冯成武.溶剂萃取蒸汽蒸馏法处理污泥[J].上海环境科学,2000,19(5):228.

(收稿日期 2019-07-03)

(编辑 王薇)