

研究报告

混合菌系 QZ-10 对原油的作用性能表征及现场清防蜡应用

魏晓霞^{#1}, 尹珺^{#2,3}, 纪淑玲¹, 程涛¹, 马莎莎¹, 薛成¹, 耿朋学^{2,3}

1 青海油田分公司钻采工艺研究院, 甘肃 敦煌 736202

2 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

3 中国科学院大学, 北京 100049

魏晓霞, 尹珺, 纪淑玲, 程涛, 马莎莎, 薛成, 耿朋学. 混合菌系 QZ-10 对原油的作用性能表征及现场清防蜡应用[J]. 微生物学通报, 2022, 49(3): 1057-1066

Wei Xiaoxia, Yin Jun, Ji Shuling, Cheng Tao, Ma Shasha, Xue Cheng, Geng Pengxue. Effect of consortium QZ-10 on crude oil and its application in the removal of oil well paraffin[J]. Microbiology China, 2022, 49(3): 1057-1066

摘要:【背景】油藏环境中呈单相液态的原油, 在开采、运送的过程中由于温度、压力及流动条件的变化, 石蜡不断从原油中析出, 造成井筒、管线的结蜡。微生物清防蜡作为一项新兴的技术, 受到广泛的关注, 但是需要根据现场的环境条件施用合适的微生物清防蜡菌液。【目的】利用来源于青海油田盐碱油藏环境的混合菌系 QZ-10, 有效解决油井结蜡的问题并探究作用机理。【方法】针对混合菌系 QZ-10 开展表面张力/界面张力测定、乳化性能分析、降黏率和防蜡率测定、烃转化能力评估, 来表征其性能特征, 同时开展现场试验验证其实际清防蜡应用价值。【结果】混合菌系 QZ-10 菌液能将水-煤油界面张力降至 1.21 mN/m, EI_{24} 值为 91.11%, 降黏率达 92.90%, 防蜡率可达到 90.00%, 并且能够减少原油中的重质烃类、增加轻质烃组分、改善原油的品质。室内实验结果表明 QZ-10 菌液具有良好的降黏和乳化性能, 展现出能够清除油井结蜡的潜力。选取青海油田中结蜡严重的油井, 利用 QZ-10 菌液进行清防蜡作业, 经过 140 d 的现场试验, 结果显示试验的油井中 80.95%油井除蜡效果明显, 其中多口油井有显著增油效果, 累计增油 1 100 t。【结论】混合菌系 QZ-10 具有优良的油井清防蜡及驱油效果, 应用前景广阔。

关键词: 微生物混合菌液; 微生物清防蜡; 油井清防蜡; 重质烃降解

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0901200)

#对本文贡献相同

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2018YFA0901200)

#These authors equally contributed to this work

*Corresponding author: E-mail: wxiaqh@petrochina.com.cn

Received: 2021-07-08; Accepted: 2021-09-12; Published online: 2021-12-14

Effect of consortium QZ-10 on crude oil and its application in the removal of oil well paraffin

WEI Xiaoxia^{#1}, YIN Jun^{#2,3}, JI Shuling¹, CHENG Tao¹, MA Shasha¹, XUE Cheng¹, GENG Pengxue^{2,3}

1 Drilling and Production Technology Research Institute of Qinghai Oilfield Company, Dunhuang 736202, Gansu, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: [Background] Under the high-temperature and -pressure condition, crude oil presents as a single-phase liquid. However, due to variations in temperature, pressure, and flow conditions during the mining and transportation processes, paraffin wax is continuously precipitated from the crude oil and deposits in the wellbore and pipelines. As an emerging technology, microbial wax removal has attracted wide attention. Nevertheless, the specific consortium applied needs to be determined according to the site conditions. [Objective] This study aims to use the consortium QZ-10 screened out from the saline-alkali reservoir environment in Qinghai oilfield to solve the problem of wax deposition in oil wells and investigate the mechanism. [Methods] The performance of QZ-10 was characterized based on surface tension/interfacial tension, EL_{24} value, viscosity reduction rate, wax prevention rate, and hydrocarbon conversion ability. Finally, field trial was carried out to verify its actual effect on paraffin removal. [Results] The fermentation broth of QZ-10 could reduce the water-kerosene interfacial tension to 1.21 mN/m, and the EL_{24} value was 91.11%. Besides, the viscosity reduction rate was measured as 92.90%, and the wax prevention rate could reach 90.00%. Furthermore, QZ-10 could degrade the heavy hydrocarbons in the crude oil, and increase the light hydrocarbon components, which would improve the quality of the crude oil. The results of laboratory experiments showed that the consortium QZ-10 reduced the viscosity of crude oil and emulsified the oil, and showed the potential to be applied in wax removal and prevention of oil well. The oil wells with severe wax deposition in Qinghai oilfield were selected for the field trial. After the injection of QZ-10 broth, paraffin wax was removed obviously in 80.95% of the tested oil wells after 140 days, and many of the tested oil wells had a significant increment in oil production, with a cumulative oil increment of 1 100 tons. [Conclusion] We demonstrated that the consortium QZ-10 could effectively remove paraffin wax deposited in oil wells and increase the oil production, which exhibited a broad application prospect.

Keywords: microbial consortium; microbial wax removal; paraffin removal; heavy hydrocarbon degradation

原油是一种重要的能源及工业原料, 其成分复杂, 根据各类化合物的结构和在有机溶剂中的不同溶解度, 可将其分为 4 个族组分, 分别为饱和烃、芳香烃、树脂和沥青质。石蜡是

一种碳原子数约为 18–30 的烃类混合物, 主要组分为直链烷烃, 以及少量的支链烷烃和环烷烃。当在高温、高压的地层环境中埋藏时, 原油呈现单相液体的状态, 此时石蜡在原油

中是完全溶解的。然而,在原油的开采、运送过程中,由于井筒和油管的压力、温度及流动条件不断变化,此时蜡结晶不断从原油中析出,聚集在管壁上,从而造成油井的结蜡^[1-2]。油井结蜡会造成许多危害,如油管堵塞增加油管载荷、降低产量,更严重的是破坏采油设备^[3],因而清除油井中沉积的蜡具有重要的意义。

针对油井结蜡的问题,通常通过热除蜡、机械除蜡、化学药剂除蜡和微生物除蜡等除蜡技术解决^[4]。其中,热洗井技术除蜡和机械除蜡是最常用的 2 种技术手段,然而热洗井会造成地层损害,机械除蜡的成本过高,都具有一定的局限性^[5]。除此以外,常采用蜡抑制剂、涂层或者绝缘材料对油井进行防护,但是这类化学药剂的防护效果并不能得到保证,并且容易造成环境污染^[6]。微生物清防蜡技术是近年兴起的经济适用的除蜡技术,其相比于机械除蜡和化学除蜡具有成本低、污染小和对环境友好的优势。此外,微生物清防蜡技术施工简单,能够避免热除蜡及机械除蜡等导致的油井停产问题,并且大大减少了热洗井的次数,有效防止了因热洗所引起的地层漏失和地层伤害,具有良好的经济效益^[7]。

有研究筛选了用于清防蜡的菌种,例如:曹怀山等针对胜利大芦湖油田油井结蜡的问题,将筛选得到的 3 株菌组合后用于清防蜡,并在多口油井中进行了推广^[8];徐登霆等从小营油田原油样品中筛选得到耐高温的混合菌组,有效减少了油井结蜡,增加了油井产量^[9]。然而,原油储藏的地层环境复杂,将会影响微生物清防蜡作业效果,因而需要依据现场的环境条件施用合适的微生物清防蜡菌液。

青海油田油藏矿化度普遍高于 10×10^4 mg/L,对于采油菌种的适应性是一大挑战。本文利用

从油田高矿化度油水样中筛出的耐盐土著混合菌系 QZ-10,通过对其乳化、降黏性能测定表征该混合菌系对于原油的作用效果。随后在花土沟油田选用 21 口井开展微生物采油现场试验,用于验证混合菌系 QZ-10 的实际应用效果,为推广该混合菌系在微生物清防蜡、微生物单井吞吐和微生物驱油等方面的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 混合菌系的来源

混合菌系 QZ-10 由青海油田分公司钻采工艺研究院提供,筛选自青海油田的高矿化度油水样。该混合菌系采用的培养基为:酵母粉 2.5 g,蛋白胨 5.0 g, NaCl 7.5 g, NH₄Cl 5.0 g, 去离子水 1 L。培养基使用 1 mol/L NaOH 溶液将 pH 调至 7.0, 1×10^5 Pa 灭菌 20 min。培养条件: 37 °C、180 r/min 培养 24 h。

1.2 主要试剂和仪器

酵母粉,北京索莱宝公司;蛋白胨、NaCl、NH₄Cl、液体石蜡、无水乙醇、氯仿,国产分析纯试剂;正己烷、二氯甲烷, Thermo Fisher 公司。表面张力仪, LAUDA 公司;流变仪, Thermo Fisher 公司;气相色谱仪, SHIMADZU 公司; HP-5 色谱柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm), Agilent 公司。

1.3 QZ-10 菌液性能评价

1.3.1 表面张力及界面张力测定

采用悬滴法^[10]测定 QZ-10 菌液的表面张力、菌液与煤油的界面张力。取菌液 50 mL, 12 000 r/min 离心 15 min 去除菌体,取上清液,用纯水分别稀释成 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%浓度,并取未稀释菌液作为 100%浓度,利用表面张力仪测定不同浓度菌液的表面张力及菌液与煤油

的界面张力。

1.3.2 乳化指数 EI_{24} 值的测定

将菌液 12 000 r/min 离心 15 min, 取上清液。用液体石蜡作为原油替代物, 取液体石蜡与菌液上清液各 4 mL 在 10 mL 试管中混合, 用旋涡混合器振荡混合, 室温静置 24 h 后观察有机相的乳化结果, 分别测量白色乳化层高度及有机相总高度, 以无菌水与液体石蜡混合作空白对照, 设置 3 组平行样。

乳化指数的计算公式: $EI_{24} = \text{乳化层高度} / \text{有机层总高度} \times 100\%$ 。

1.3.3 防蜡率的测定

用倒扣瓶法分析菌液对原油的防蜡率。将菌液按 10% 浓度加入到含 20% 原油的 200 mL 培养基中, 37 °C、180 r/min 恒温摇床培养, 对照实验用无菌水替代菌液, 设 3 组平行样。7 d 后, 在 37 °C 的恒温培养箱中将锥形瓶倒扣入接收容器中, 恒温 60 min 至锥形瓶不再滴出液体, 称锥形瓶重量。

根据 2 组锥形瓶质量差平均值计算防蜡率, 防蜡率计算公式: $E = [1 - (m_i - m_{ki}) / (m - m_k)] \times 100\%$
式中: E 为发酵菌液对原油的防蜡率(%); m_i 为加菌液营养液锥形瓶+残油质量(g); m_{ki} 为加菌液营养液锥形瓶空瓶质量(g); m 为对照组锥形瓶+残油质量(g); m_k 为对照组锥形瓶空瓶质量(g)。

1.3.4 原油黏度测定

将菌液按 10% 浓度加入到含 20% 原油的 200 mL 培养基中, 37 °C、180 r/min 培养 7 d。以未经微生物作用的脱水原油做空白对照, 采用流变仪分别测定微生物作用前后的原油在 37 °C 下的原油黏度。

1.3.5 原油族组分分析

将菌液按 10% 浓度加入到含 20% 原油的

200 mL 培养基中, 37 °C、180 r/min 培养 7 d, 以无菌水作为对照。将微生物处理前后的样品, 分别 10 000 r/min 离心 15 min 进行油水分离, 取上层原油, 用层析柱法分析微生物作用前后原油族组分变化, 检测依据参考文献[11]。用正己烷沉淀、过滤原油中的沥青质溶液, 其滤液分别采用正己烷分离出饱和烃, 用二氯甲烷与正己烷混合溶剂(2:1, 体积比)淋洗出芳香烃, 先用无水乙醇, 后用氯仿淋洗胶质。获取的沥青质、饱和烃、芳香烃和胶质溶液挥发溶剂至恒重后称量, 计算试样中各族组分的质量分数。

1.3.6 饱和烃色谱分析

将原油中分离得到的饱和烃组分用适量正己烷溶解, 并稀释 100 倍, 采用分流进样的方式注入气相色谱仪中, 采用 HP-5 色谱柱进行分离, 经氢火焰离子化检测器进行检验。

1.4 QZ-10 菌液的现场应用

根据室内实验结果, 该菌液具有良好的防蜡及降黏效果, 在油田现场选结蜡严重油井开展微生物清防蜡的现场试验。

1.4.1 油井概况

现场试验井所在油藏埋深 256–1 600 m, 含油井段 200–500 m, 原始地层压力为 0.540–4.106 MPa, 油藏温度为 27–38 °C。储层岩石孔隙度为 18%–22%。地层水矿化度为 104 627–256 752 mg/L, pH 6.0–9.0。试验油井平均热洗周期为 30 d, 部分油井套管损坏导致热洗液无法返排, 洗井液泄漏至地层易对储层造成伤害。

1.4.2 现场施工

应用 QZ-10 菌液开展 2 次共 21 口井现场试验。配制发酵培养基进行大规模发酵, 参数设置如下: 转速 150–200 r/min, 温度 37 °C, 压力为 0.5 MPa, 通气比在 0.2–0.5 VVM。

每口井按菌液含量为 10% 和营养液含量为 6%，利用水调配后的清防蜡菌剂从套管注入，清防蜡菌剂的注入量为 1 m^3 ，作业后调低冲次，油井正常生产。定期监测油井示功图及油井产量，观察油井载荷和产油量的变化。

2 结果与讨论

2.1 QZ-10 菌液的性能评价

将 QZ-10 菌液的上清液稀释至浓度为 10%–90% 的样品和上清液原液，测定其表面张力及界面张力，结果如图 1 所示。菌液的表面张力随菌液浓度的升高而降低，10% 菌液的表面张力为 33.03 mN/m ，100% 菌液的表面张力为 27.21 mN/m 。然而室温下纯水的表面张力为 73.00 mN/m ^[12]，表明该菌液所产的表面张力在浓度较低时也能有效降低纯水的表面张力。菌液上清液与煤油之间的界面张力同样随着菌液浓度的升高而降低，10% 菌液与煤油的界面张力为 3.07 mN/m ，100% 菌液与煤油的界面张力为 1.21 mN/m 。由此表明 QZ-10 菌液中所含的

生物表面活性剂可有效降低油-水界面张力，提高驱油效率，改变岩石润湿性，使岩石更加亲水，可洗脱岩石孔壁油膜，提高油相流动能力。

此外，测定了 QZ-10 菌液的 EI_{24} 值、防蜡率、降黏率，结果表明菌液的 EI_{24} 值为 91.11%，具有良好的乳化性能；而在油藏温度 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 下，原油黏度从 $347.78 \text{ m}\cdot\text{Pas}$ 降至 $24.66 \text{ m}\cdot\text{Pas}$ ，降黏率达 92.90%。利用倒扣瓶法测得 QZ-10 菌液的防蜡率可达到 90.00%，表明该菌液具有有效防止油井井筒结蜡的潜力，可用于油井清防蜡作业。

有不少研究通过筛选获得了具有产表面活性剂功能的单菌或混菌。例如：王卫强等^[13]从辽河油田受石油污染土壤中筛选得到一株假单胞菌(*Pseudomonas* sp.) W12#，其所产的糖脂类表面活性剂 EI_{24} 值达到 62.50%，除蜡率为 34.66%，降黏率为 63.75%；孟凡怡等^[14]将枯草芽孢杆菌与铜绿假单胞菌进行复配得到双菌混合体系，双菌混合体系的 EI_{24} 值达到 55.39%，复配培养后可将发酵液表面张力降至 38.83 mN/m ，降黏率为 64.72%。由此可见，混合菌液 QZ-10 的性能不仅强于单菌，在混菌体系性能方面也具有较强的优势。

2.2 原油族组分分析

原油是一种复杂混合物，单一菌剂对原油的处理效果是有限的，往往只能实现单一的作用效果，而混合菌在协同作用的过程中能够功能互补，增强对原油的处理效率^[15]。对 QZ-10 菌液处理前后的原油族进行组分分析，将其分为饱和烃、芳香烃、胶质及沥青质 4 个组分，各个组分的含量如图 2 所示。从图 2 中可以看出，经过 QZ-10 菌液处理后，原油中的饱和烃含量增加，芳香烃及胶质组分减少，沥青质组分基本不变。混合菌系 QZ-10 在处理原油的过程中表现出较好的协同共生效应，将原油中的

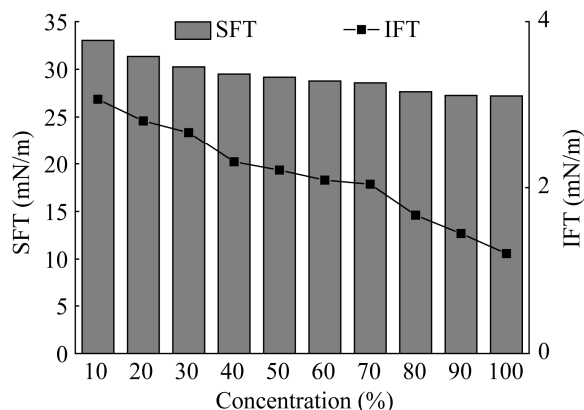


图 1 不同菌液浓度的表面张力(SFT)和界面张力(IFT)

Figure 1 Surface tension (SFT) and interfacial tension (IFT) of bacterial consortium QZ-10 at different concentrations.

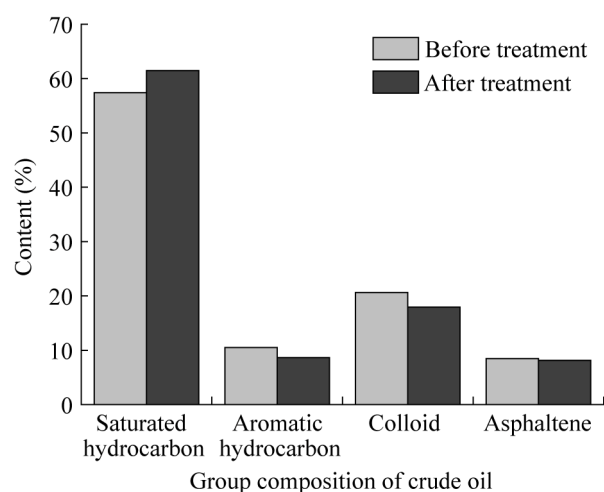


图2 原油族组分分析

Figure 2 Crude oil group analysis.

芳香烃及胶质组分分解, 增加原油中的有效饱和烃组分, 提升了原油的品质。

利用气相色谱进一步对处理前后原油中的饱和烃组分进行分析, 检测不同饱和烃组分的含量变化, 结果如图3所示。经过QZ-10菌液处理后的原油, C₁₁–C₁₄的直链烷烃含量增加2.25%, C₁₅–C₃₄长链烷烃含量皆有不同程度的减少, 累计减少5.96%。可知QZ-10菌液对长链烷烃进行了分解, 原油中重质组分的减少降低了原油的黏度。Luo等^[16]从石油污染的土壤中筛选得到假单胞菌(*Pseudomonas* sp.) DG2能够产表面活性剂降低表面张力, 并且能够降解原油中的重质组分C₂₅–C₃₂, 表明该菌具有油井清防蜡及驱油的潜力。在本研究中, 混合菌系QZ-10具有较强的产表面活性剂的能力, 而且能减少原油中的重质烃组分, 因而该菌系在油井清防蜡及驱油中具有很好的应用前景。

2.3 QZ-10菌液的清防蜡效果

微生物菌液清除油井结蜡能够有效地改善油井载荷, 降低采油负荷。对现场21口试验井注入混合菌液后, 有17口井实现了油井清

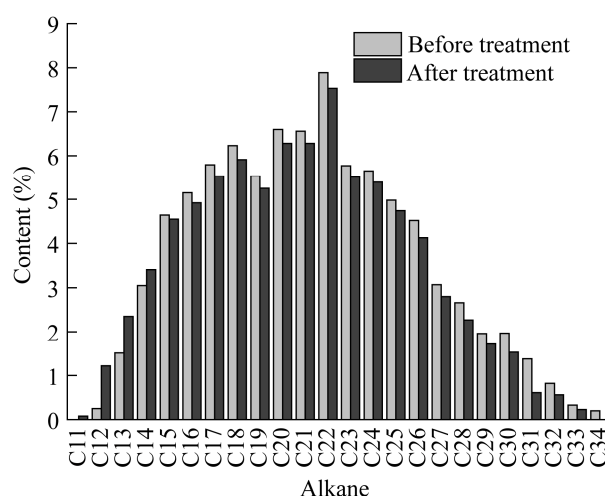


图3 原油饱和烃色谱分析

Figure 3 Chromatographic analysis of saturated hydrocarbon in crude oil.

防蜡, 有效率达到80.95%。经过此次菌液清防蜡作业, 平均延长洗井周期30 d。

对S234X井分别在2019年11月29日及2020年6月10日进行2次微生物清防蜡作业, 对油井的载荷进行持续周期性监测, 每7 d记录一次, 绘制折线图如图4所示。从图4中可以看出, 进行清防蜡作业后油井载荷相比作业前载荷下降明显, 2次清防蜡作业后下降幅度分别为36%和21%。自第一次注入菌液进行清防蜡作业后, 持续有效期大于140 d, 期间油井载荷差值均低于基准线。

微生物通过产出表面活性剂、降解长链烷烃的方式, 能够有效地改善原油的流动性及品质, 减少蜡质组分在井筒的沉积。Zhang等^[17]从中国西北的安塞油田筛得一株解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) 6-2c, 既能够产表面活性剂, 改变原油的表面张力及界面张力, 与多种碳氢化合物形成稳定的乳液; 也能够对长链石蜡烃进行降解, 清除油井壁的结蜡, 并抑制石蜡的沉积。袁虎^[18]在跃进II号油田中开展油井清防蜡作业, 持续加微生物菌剂

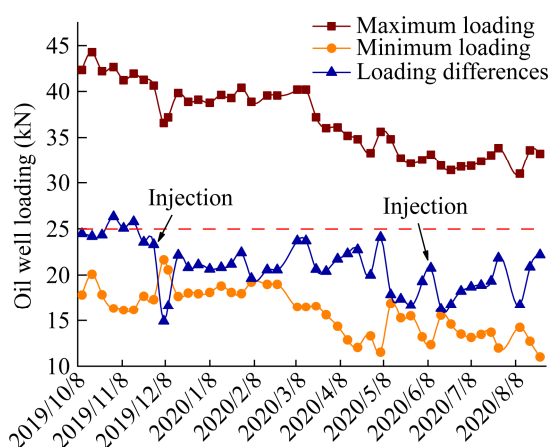


图 4 S234X 井清防蜡作业前后载荷变化情况

Figure 4 Change of load of the S234X well before and after paraffin removal and prevention.

4 个月, 加菌剂周期为 30 d, 使得油井最大载荷由 47.44 kN 降低至 39.15 kN, 最小载荷由 9.24 kN 升高至 13.62 kN。在本研究中, 单次注入菌剂即可有效降低油井载荷差, 并且持续有

效期大于 140 d, 作用效果更好。

2.4 油井产油量变化

混合菌系 QZ-10 对原油具有良好的降黏和乳化效果, 能够增加原油的流动性, 因而对于油井的产油量具有一定的促进效果。对 21 口油井的日产液、日产油及含水率进行统计, 其中有 16 口井具有明显的增产效果, 占清防蜡试验井的 76.19%, 累计增油 1 100 t。对施工前后 16 口油井的日产液、日产油及含水率进行统计, 如表 1 所示, 可知其日产液、日产油有不同程度的增加, 而含水率明显下降, 含水率相比措施前下降幅度最大为 54.35%。

对该 16 口油井的日产油增量进行计算, 结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 最大日产油增量可以达到 154.00%, 最小日产油增量为 6.89%。由此说明 QZ-10 菌液的注入对油藏环境中的原油具有一定的作用效果, 这与以往的

表 1 施工前后油井生产情况

Table 1 Production before and after treatment

Oil wells	Production before treatment			Production after treatment		
	Fluid production (m ³ /d)	Oil production (t/d)	Water content (%)	Fluid production (m ³ /d)	Oil production (t/d)	Water content (%)
S192S	2.92	2.03	30.46	2.86	2.17	23.92
S172S	6.16	2.40	61.00	6.09	2.72	55.23
S172X	6.63	2.44	63.10	6.29	3.00	58.06
S1281S	1.99	1.34	34.08	2.43	2.10	13.44
S1281X	2.63	0.59	77.43	1.97	1.50	23.08
S234X	4.31	2.01	53.36	5.77	2.42	57.31
N222	2.46	1.46	40.45	2.14	2.12	1.34
N614X	3.57	1.77	50.60	3.52	2.00	42.96
N9-14-5	3.49	1.24	64.40	3.38	2.05	41.20
XS158	0.64	0.43	32.14	0.62	0.55	16.05
S1121X	4.15	1.47	64.48	5.82	1.60	72.80
S173	4.72	2.40	46.25	5.95	2.81	52.70
N523	5.97	2.29	57.54	5.92	2.52	56.72
S342	10.53	2.82	73.18	10.32	3.52	65.09
S412X	2.38	0.92	60.93	2.42	1.22	48.69
N512X	0.87	0.58	33.17	0.84	0.62	27.14

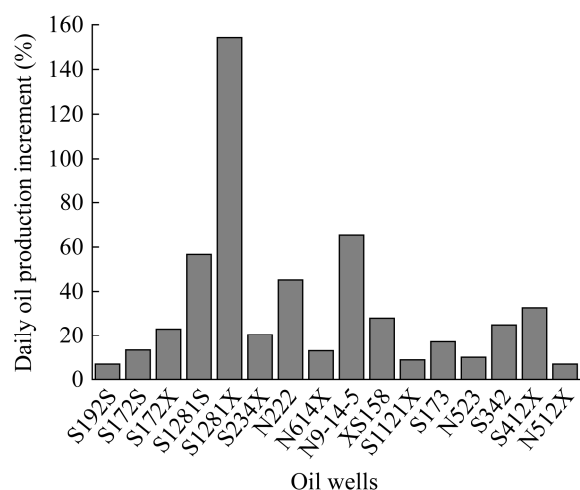


图5 施工后16口油井日产油增量

Figure 5 Increment in daily oil production from 16 oil-wells after injection.

研究相似^[8-9,13]。在油井中注入 QZ-10 菌液,一方面菌液中的各类微生物能够通过自身的代谢作用驱出原油,另一方面利用微生物代谢产物可乳化、降解原油。Ke 等^[19]从油田筛选得到的螯合球菌(*Chelatococcus daeguensis*) HB-4 能将原油作为唯一碳源,将原油中的长链烃降解为短链烃,并且经过岩芯驱油试验验证了该菌提高原油采收率的作用。Shibulal 等^[20]筛选获得一株爱媛类芽孢杆菌(*Paenibacillus ehimensis*) BS1,在好氧条件下将重质原油转化为轻质脂肪族和芳香族化合物,能够有效地从油藏中驱出原油。以上结果表明,微生物通过产表面活性剂及对重质烃类的降解,能够促进原油的流动,提高原油采收率。另一方面,外来菌液的注入将会使油藏环境中的微生物群落组成及功能发生改变^[21]。油藏环境中含有丰富的微生物资源,它们能够通过自身的代谢作用改变原油的组成成分及性能^[22]。然而由于地层环境的异质性,例如岩石的渗透率等,导致不同地层环境中原油的流动性不一样;其次地层含水率、地层水中离子含量等差异,导致不同的油井环

境中微生物的群落组成具有较大的差异,因而对于不同的油井存在日产油增量的不同^[23-24]。

与此类似的, Wang 等^[25]通过岩芯驱油试验研究了枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*) XT-1 的微生物提高原油采收率(microbial enhanced oil recovery, MEOR)潜力,发现该菌液在实验室环境下能够提高采收率为 6.88%–13.38%。采用复合菌液驱油的研究较少。申坤^[26]在其研究中,采用复合发酵菌液的方式,在陕西省安塞油田油井中注入微生物菌液实行单井吞吐,实现日产油净增量为 11.51%。本研究所采用的混合菌液对 16 口油井作业后最大日产油增量可以达到 154.00%,驱油效率优于其他研究。然而,少有研究同时对清防蜡及驱油效果进行研究,本试验对清防蜡菌液的驱油效果进行了充分的阐述。可见本试验中的混合菌系 QZ-10 在对油井进行清防蜡的同时,能够显著地提高原油采收率,在提升油田采收率方面具有很大的应用价值。

3 结论

微生物菌液作用于原油的作用机理,一方面是微生物可以产生表面活性剂等代谢产物,降低原油与水、岩石的界面张力,增加原油的流动性^[27];另一方面是微生物可以降解原油中的重质组分及杂质,增加原油中的有效轻质组分,降低原油的黏度^[28-30]。从青海油田油水样中富集筛选得到的混合菌系 QZ-10 能够产生表面活性剂,具有很好的降低表面张力、降黏、防蜡的作用;并且经过原油组分的分析,表明 QZ-10 菌液中的各种微生物能够协同作用于石油烃,减少原油中的芳香烃和胶质含量,增加短链饱和烃组分,改善原油的品质。将菌液用于高矿化度油井微生物清防蜡作业,现场试验效果良好,措施有效率达 80.95%,平均延长洗

井周期 30 d, 累计增油 1 100 t, 该混合菌系 QZ-10 对高矿化度油藏的适应性良好。因而混合菌系 QZ-10 可用于微生物清防蜡, 微生物单井吞吐、微生物驱油等微生物采油技术, 但需进一步优化微生物清防蜡工艺参数, 包括菌剂的注入量及注入周期等, 以提高其现场作业应用效率。

REFERENCES

- [1] Pedersen KS, Rønningsen HP. Influence of wax inhibitors on wax appearance temperature, pour point, and viscosity of waxy crude oils[J]. *Energy & Fuels*, 2003, 17(2): 321-328
- [2] Towler BF, Jaripatke O, Mokhtab S. Experimental investigations of the mitigation of paraffin wax deposition in crude oil using chemical additives[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2011, 29(5): 468-483
- [3] Feng ZM, Sun Y, Liu XL, Cui W, Duan WB. Design and application of new impeller-type wax-proof device based on speed-increasing wax-proof mechanism[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 200: 108392
- [4] Sousa AL, Matos HA, Guerreiro LP. Preventing and removing wax deposition inside vertical wells: a review[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, 9(3): 2091-2107
- [5] 郭健. 油井结蜡机理与清防蜡方法[J]. *化学工程与装备*, 2020(2): 140-141
- Guo J. Mechanism of oil well paraffin formation and method of paraffin removal and prevention[J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2020(2): 140-141 (in Chinese)
- [6] Jing GL, Ye P, Zhang YL. The action mechanism of wax inhibitors (WI) on pour point and viscosity of mixed waxy oil[J]. *Petroleum Chemistry*, 2017, 57(3): 293-298
- [7] 李良帮, 宋草根, 吴中贵. 微生物清防蜡技术在文南油田的应用[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2019, 16(1): 56-58, 7
- Li LB, Song CG, Wu ZG. Application of microbial wax removal and control technology in Wennan oilfield[J]. *Journal of Yangtze University: Natural Science Edition*, 2019, 16(1): 56-58, 7 (in Chinese)
- [8] 曹怀山, 谭云贤, 王磊, 韦良霞. 大芦湖油田微生物防蜡技术[J]. *油田化学*, 2010, 27(1): 12-15
- Cao HS, Tan YX, Wang L, Wei LX. Microbial paraffin inhibition in daluhu oilfield[J]. *Oilfield Chemistry*, 2010, 27(1): 12-15 (in Chinese)
- [9] 徐登霆, 苏俊杰, 王静, 孙耀国, 曹功泽, 赵凤敏. 微生物防蜡技术在小营油田的应用[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(3): 309-311, 18
- Xu DT, Su JJ, Wang J, Sun YG, Cao GZ, Zhao FM. Application of microbial wax prevention technique in xiaoying oilfield[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(3): 309-311, 18 (in Chinese)
- [10] Song BH, Springer J. Determination of interfacial tension from the profile of a pendant drop using computer-aided image processing: 2. experimental[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996, 184(1): 77-91
- [11] 岩石中可溶有机物及原油族组分分析[S]. 北京: 石油工业出版社, 2016
- SY/T5119-2016. Analysis method of family composition of rock extracts and crude oil[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016
- [12] 蔡碧毓, 杨继涛. 基于梯度理论计算纯水表面张力[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1996, 20(5): 77-80
- Cai BY, Yang JT. Estimation of surface tension of water based on the gradient theory[J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1996, 20(5): 77-80 (in Chinese)
- [13] 王卫强, 崔静, 吴尚书, 董美, 张海娟. 石油烃降解菌 *Pseudomonas* sp. 及其生物表面活性剂对原油处理效果分析[J]. *石油学报(石油加工)*, 2020, 36(5): 1039-1046
- Wang WQ, Cui J, Wu SS, Dong M, Zhang HJ. Effect of petroleum hydrocarbon decomposing bacteria *Pseudomonas* sp. and its biosurfactants on crude oil treatment[J]. *Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section*, 2020, 36(5): 1039-1046 (in Chinese)
- [14] 孟凡怡, 杜胜男, 冯宪明, 王超, 王卫强. 复配菌对含蜡原油含蜡量及其黏度作用分析[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2020, 40(6): 14-20
- Meng FY, Du SN, Feng XM, Wang C, Wang WQ. Effect of compound bacteria on wax content and viscosity of waxy crude oil[J]. *Journal of Liaoning Shihua University*, 2020, 40(6): 14-20 (in Chinese)
- [15] 詹亚斌, 张桥, 陈凯伦, 李方敏, 马立安. 石油降解菌群的筛选、构建及其降解特性研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(8): 860-864, 868
- Zhan YB, Zhang Q, Chen KL, Li FM, Ma LA. Isolation and construction of petroleum-degrading flora and their

- degrading characteristics[J]. Environmental Pollution & Control, 2017, 39(8): 860-864, 868 (in Chinese)
- [16] Luo C, Wang WQ, Zhang HJ, Yu X, Wang GF. Microbial treatment of waxy crude oil for mitigating wax precipitation and improving liquidity[J]. Petroleum Science and Technology, 2019, 37(4): 471-478
- [17] Zhang JH, Lai HX, Gao H, Hu SB, Xue QH. Prevention and mitigation of paraffin deposition by biosurfactant-producing and paraffin-degrading *Bacillus amyloliquefaciens* strain 6-2c[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 335: 510-519
- [18] 袁虎. 微生物清防蜡技术在青海油田跃进 II 号油藏的应用效果分析[J]. 内蒙古石油化工, 2016, 42(7): 118-119
- Yuan H. Analysis of application of microbial wax removal and control technology in Yuejin II reservoir in Qinghai oilfield[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2016, 42(7): 118-119 (in Chinese)
- [19] Ke CY, Lu GM, Wei YL, Sun WJ, Hui JF, Zheng XY, Zhang QZ, Zhang XL. Biodegradation of crude oil by *Chelatococcus daeguensis* HB-4 and its potential for microbial enhanced oil recovery (MEOR) in heavy oil reservoirs[J]. Bioresource Technology, 2019, 287: 121442
- [20] Shibulal B, Al-Bahry SN, Al-Wahaibi YM, Elshafie AE, Al-Bemani AS, Joshi SJ. The potential of indigenous *Paenibacillus ehimensis* BS₁ for recovering heavy crude oil by biotransformation to light fractions[J]. PLoS ONE, 2017, 12(2): e0171432
- [21] 胡婧, 曹功泽, 王文杰, 吴晓玲, 曹嫣蓓, 汪卫东, 唐存知. 沾 3 内源微生物驱的生物特征变化及其对驱油效果的影响[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2017, 41(4): 174-179
- Hu J, Cao GZ, Wang WJ, Wu XL, Cao YB, Wang WD, Tang CZ. Change of biological features and its impact on flooding effect of indigenous MEOR in Zhan3 block[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2017, 41(4): 174-179 (in Chinese)
- [22] Hallmann C, Schwark L, Grice K. Community dynamics of anaerobic bacteria in deep petroleum reservoirs[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(9): 588-591
- [23] You J, Wu G, Ren FP, Chang Q, Yu B, Xue YF, Mu BZ. Microbial community dynamics in Baolige oilfield during MEOR treatment, revealed by Illumina MiSeq sequencing[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(3): 1469-1478
- [24] Li GQ, Gao PK, Wu YQ, Tian HM, Dai XC, Wang YS, Cui QF, Zhang HZ, Pan XX, Dong HP, et al. Microbial abundance and community composition influence production performance in a low-temperature petroleum reservoir[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(9): 5336-5344
- [25] Wang XT, Yu L, Li XZ, Li Y, Cui QF, Dong H, Lin W. A thermotolerant surfactant-producing strain XT-1 applied for exogenous microbial enhanced oil recovery[J]. Petroleum Science and Technology, 2018, 36(8): 609-617
- [26] 申坤. 安塞低渗透油田微生物采油先导性试验[D]. 西安: 西北大学硕士学位论文, 2013
- Shen K. Pilot experiment of microbial oil recovery in Ansai low permeability oilfield[D]. Xi'an: Master's Thesis of Northwest University, 2013 (in Chinese)
- [27] 王大威, 张世仑, 靖波, 何春百, 张健, 马挺. 产表面活性剂菌与稠油降解菌复配对原油黏度的影响[J]. 油田化学, 2019, 36(1): 147-151
- Wang DW, Zhang SL, Jing B, He CB, Zhang J, Ma T. Synergistic effect of surfactant producing bacteria and degrading bacteria on the viscosity of heavy oil[J]. Oilfield Chemistry, 2019, 36(1): 147-151 (in Chinese)
- [28] 吴慧君, 宋权威, 郑瑾, 于文赫, 张坤峰, 林双君, 梁如冰. 微生物降解石油烃的功能基因研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, 47(10): 3355-3368
- Wu HJ, Song QW, Zheng J, Yu WH, Zhang KF, Lin SJ, Liang RB. Function genes in microorganisms capable of degrading petroleum hydrocarbon[J]. Microbiology China, 2020, 47(10): 3355-3368 (in Chinese)
- [29] 于洋, 刘琦, 彭勃, 吕静. 微生物降解稠油中沥青质的研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(3): 1574-1585
- Yu Y, Liu Q, Peng B, Lyu J. A review of the biodegradation of asphaltene in heavy oil[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(3): 1574-1585 (in Chinese)
- [30] Al-Sayegh A, Al-Wahaibi Y, Al-Bahry S, Elshafie A, Al-Bemani A, Joshi S. Microbial enhanced heavy crude oil recovery through biodegradation using bacterial isolates from an Omani oil field[J]. Microbial Cell Factories, 2015, 14: 141