

文章编号: 1000-7393(2008)05-0096-05

# 生物酶解堵增产研究与应用

苏崇华<sup>1,2</sup>

(1. 西南石油大学, 四川成都 610500; 2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057)

**摘要:** 为了解除重质组分污染和钻井滤液污染造成的储层堵塞, 研究了当前常用的 2 种酶阿波罗酶和 SUN 酶的解堵性能, 经过表观分析、稳定性研究、含菌分析实验、蛋白分析实验、糖组分分析、生物表面活性剂的分析实验、与原油界面张力的测定, 认识了 2 种酶对岩石润湿性的改善、洗油作用、乳化原油能力以及解堵机理。模拟实验结果表明, 2 种酶均可不同程度地解除地层的重质组分堵塞, 特别是用地层水配制的阿波罗酶解堵剂能有效地解除钻井滤液对地层造成的堵塞。介绍了生物酶解堵选井原则, 矿场实施工艺方案、施工方案及效果评价, 在处理半径 1.8 m、阿波罗酶溶液体积分数为 4% 条件下对海上油田 2 口油井已实施解堵, 增产效果良好, 值得类似油田借鉴。

**关键词:** 生物酶; 阿波罗酶; SUN 酶; 解堵; 岩石润湿性; 洗油; 增产

**中图分类号:** TE39      **文献标识码:** A

## Research and application of biological enzyme as plug remover for stimulation

SU Chonghua<sup>1,2</sup>

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. CNOOC Ltd.-Zhanjiang, Zhanjiang 524057, China)

**Abstract:** In order to remove the formation blockage resulted from heavy component pollution and drilling fluid pollution, this paper studies the plug removal performance of two kinds of enzyme (Apollo and SUN) now widely used. Through the appearance analysis, stability study, analysis experiments about bacteria content, protein, sugar component and bio surfactant and interfacial tension measurement, we recognize the roles of two enzymes in improving rock wettability and sweeping oil, and their ability to emulsify crude oil and plug removal mechanism. Simulation experiment results demonstrate that two enzyme can release the heavy component blockage in different degree, especially the Apollo enzyme solution prepared with formation water can remove the formation blockage resulted from drilling fluid. The paper introduces the well selection principle of plug removal with biological enzyme, field operation technique scheme, operation scheme and effect evaluation. Plug removal operation was implemented in 2 oil wells of offshore oilfield in terms of 1.8m treatment radius of and 4% mass fraction of Apollo solution and the results of the reservoir stimulation are successful giving a reference to similar oilfield.

**Key words:** biological enzyme; Apollo enzyme; SUN enzyme; plug removal; rock wettability; washing oil; stimulation

有关酶在油气田中用途的文献较少<sup>[1]</sup>, 用生物酶进行采油仅进行了初步研究<sup>[2-3]</sup>。要真正运用于油气田开发, 还需进行生物酶常规特性、解堵机理研究, 运用合适的施工方案, 笔者就这三方面进行深化研究, 取得了突破, 并运用于油田, 解堵增油效果好。

## 1 生物酶常规特性 Conventional characteristics of biological enzyme

当前用于处理油井的生物酶主要分为 2 种: 阿

攻关项目: 中海石油(中国)有限公司综合科研项目“HND 油田储层伤害机理及增产措施研究与应用”部分成果。

作者简介: 苏崇华, 1993 年毕业于西南石油学院油藏工程专业, 高级工程师, 在读博士生, 现主要从事油气田开发生产研究和项目管理工  
作。电话: 0759-3900548, E-mail: suchh@cnooc.com.cn。

波罗酶和 SUN 酶。通过对 2 种生物酶的表现分析、稳定性研究、含菌分析实验、蛋白分析实验、糖组分分析、生物表面活性剂的分析实验、与原油界面张力的测定,实验结论如下。

(1)阿波罗酶解堵剂密度与水相同,溶于水,外观颜色为棕(茶)色半透明浓缩液体,有发酵气味,pH 值为 7,属中性,对油田管线无腐蚀。SUN 生物酶解堵剂外观为淡黄色均匀膏状物或黏稠液体,密度  $1.01 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ ,pH 值为 7,与水互溶,见图 1。



图 1 生物酶外观  
Fig.1 Appearance of biological enzyme

(2)阿波罗酶对矿化度敏感,5000 mg/L 以上出现盐析现象,热稳定性好;SUN 酶的盐稳定性和热稳定性都好。

(3)阿波罗酶检测到活菌数为  $4.9 \times 10^6$  个/mL;SUN 酶没有检测到活菌。

(4)阿波罗酶蛋白浓度为 1.73 g/L,不含有脂肽、脂蛋白类脂溶性生物表面活性剂;SUN 酶不含蛋白,更不含有脂肽、脂蛋白类生物表面活性剂。

(5)阿波罗酶和 SUN 酶都含有生物表面活性剂糖脂,它们的总糖含量分别为 6.91 g/L 和 0.56 g/L;

(6)阿波罗酶和 SUN 酶都能够降低 HND-2 油田地层水表面张力以及 HND-2 油田油/水界面张力。

## 2 生物酶解堵机理

### Mechanism of plug removal with biological enzyme

#### 2.1 岩石润湿性的改善

##### Improvement of rock wettability

2.1.1 吸液速度 饱和模拟重质油处理后,毛管吸液速度明显变慢,液面稳定时间明显变长,用模拟重质油浸泡过的毛管内壁局部油无法用地层水洗脱,呈现斑状分布,由此断定模拟重质油使毛管润湿性局部发生了变化。不论用体积分数为 8% 的阿波罗酶还是用 8% 的 SUN 酶溶液浸泡过后,吸液速度明显变快,几分钟液面高度就能超过处理前的水平,说

明生物酶溶液使毛管润湿性发生了变化。

2.1.2 吸液高度 饱和模拟重质油之前液面高差为 1.46 cm,饱和模拟重质油之后变为 0.28 cm,降低了 80.82%,说明饱和模拟重质油后水湿程度降低。

用地层水配制的体积分数为 8% 的阿波罗酶溶液处理 24 h 后,液面高差变为 0.77 cm,比处理前提高了 175%,处理 48 h 后,液面高差变为 0.88 cm,比处理前提高了 214%,由此证明阿波罗酶有改变地层润湿性的作用。

用地层水配制的体积分数为 8% 的 SUN 酶溶液处理 24 h 后,液面高差变为 0.83 cm,比处理前提高了 196%,处理 48 h 后,液面高差变为 0.91,比处理前增加了 225%,由此证明 SUN 酶具有改变岩石润湿性的作用。

#### 2.2 洗油作用

##### Washing oil effect

如图 2 和图 3 所示,阿波罗酶溶液或 SUN 酶溶液处理过的试管,基本都不会形成大面积连续的油膜或较大油滴,油呈斑点状吸附于试管内壁。阿波罗酶溶液试管底部的重质组分也能很容易地洗掉,阿波罗酶清洗重质组分的能力强,SUN 生物酶试管底部沉积的重质组分不能被完全洗掉。



图 2 阿波罗酶洗油实验油水混合 48 h 后状态  
Fig.2 Oil-water state after mixing for 48h in washing oil experiment with apollo enzyme



图 3 SUN 酶洗油实验油水混合 48 h 后状态  
Fig.3 Oil-water state after mixing for 48h in washing oil experiment with SUN enzyme

### 2.3 乳化原油能力

#### Emulsified crude oil capacity

如图4,油水混合之初,地层水、阿波罗酶溶液跟原油都有明显的界面,而SUN酶溶液与原油的界面模糊,说明SUN酶溶液具有较强的乳化原油的能力。



图4 油水混合后的初始状态  
Fig.4 Initial state of oil-water mixture

由图5可以看出,油水混合摇匀后,地层水与原油之间存在模糊的界面,阿波罗酶与SUN酶看不到油水界面,由此说明阿波罗酶、SUN酶中都含有表面活性物质,都有使油水趋于混相的能力。



图5 油水混合初期摇匀后的状态  
Fig.5 Oil-water state at the initial mixing stage after shaking up

由图6可以看出,作用48h后,装有地层水的三角瓶中水量明显超过刻度线,说明室温下未脱水的地层原油在78℃条件下会自行破乳;装有8%阿波罗酶的三角瓶中水量也超出原来的刻度线,但是不及装有地层水的三角瓶中水量多;而装有8%SUN酶的三角瓶中无法看到原来的刻度线。由此也说明了阿波罗酶、SUN酶中都含有表面活性物质,而且SUN酶中表面活性物质的含量更高。

由图7可看出,作用48h后摇匀,装有地层水的三角瓶内有明显的油水界面,而装有SUN酶的三角瓶根本看不到油水界面,由此也说明SUN酶中含有表面活性物质,能使原油乳化。装有阿波罗酶的三角瓶可模糊地看到油水界面,且油水界面的位置明

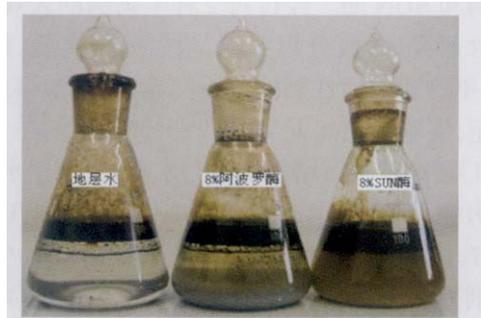


图6 油水混合48h后的状态  
Fig.6 Oil-water state after mixing for 48 h

显高于装地层水的三角瓶中油水界面的位置,由此说明经阿波罗酶作用48h后的原油不易再次乳化。



图7 油水混合48h摇匀后的状态  
Fig.7 Oil-water state after mixing for 48 h and shaking up

### 2.4 生物酶解堵机理小结

#### Summary of plug removal mechanism with biological enzyme

(1) 阿波罗酶和SUN酶都有较好的改善润湿性的能力,残存的活性物质在地层岩石上形成一定厚度的吸附层,可稳定岩层,使岩石表面变为水润湿,阻止垢再次沉积;随着润湿性的改变,增大油相渗透率,减小水相渗透率,将降低含水率,起到“控水增油”的作用。

(2) 利用生物酶及其活性物质的激活催化作用,促进物理和化学作用快速进行,多种活性物质快速将油垢从堵塞处剥离,疏通渗流通道,增强原油流动性。

(3) 阿波罗酶和SUN酶都有很好的乳化分散原油的能力。

### 3 生物酶解堵模拟实验

#### Simulation experiment of plug removal with biological enzyme

油田开发过程中,随开采时间延长,地层能量减少,压力降低,导致原油脱气。在近井地带由于“压

降漏斗”的存在,原油脱气更加严重。轻质组分的减少使得胶质、沥青质含量相对增多,原油黏度增加,携砂能力增强。胶质、沥青质具有表面活性物,会在孔隙壁面上吸附,减小油流通道,使地层的润湿性发生变化,另外胶质、沥青质也会在无机颗粒上吸附,形成油、蜡包裹体,堵塞孔喉,这些因素最终导致油相渗透率降低,油井产量衰减。为解除胶质沥青质堵塞引起的地层堵塞,需对这种污染进行评价。

### 3.1 重质组分污染和解除模拟实验结果

#### Simulated experiment result of heavy component pollution and its removal

(1)用地层水配制的8%或4%的阿波罗酶溶液都对地层的重质组分堵塞有97%的解除作用。

(2)用蒸馏水配制的8%的阿波罗酶不会产生沉淀,但不能很好地解除地层堵塞,原因是地层矿物中的水敏成分引起黏土膨胀,从而降低了渗透率。

(3)用地层水配制的SUN酶溶液解堵效果好于阿波罗酶,能够107.7%解除地层的重质组分堵塞。解堵后油相渗透率超过地层堵塞前7.7%,说明SUN酶能够改变地层的润湿性,增大地层渗流能力。

### 3.2 钻井滤液污染和解除模拟实验结果

#### Simulated experiment result of drilling fluid pollution and its removal

(1)用地层水配制的4%、8%的阿波罗酶解堵剂都能有效解除钻井滤液对地层造成的堵塞。

(2)用蒸馏水配制的体积分数为8%的阿波罗酶溶液不但不会解堵反而对地层造成更严重的伤害,这是由地层中的水敏矿物膨胀引起的。

(3)SUN酶解堵剂不能对钻井滤液造成的堵塞进行有效解堵,反而会使伤害更加严重。

## 4 矿场实施

### Field application

#### 4.1 选井原则

##### Well selection principle

- (1)储层伤害多为胶质、沥青质、蜡质堵塞;
- (2)润湿性改变而导致产能下降;
- (3)原油胶质沥青质含量较高。

通过储层物性分析,选择HND-2-A9井进行生物酶解堵。

#### 4.2 施工参数设计

##### Design of operation parameters

##### 生物酶用量设计

$$v=n\pi r^2 h \phi \quad (1)$$

式中, $v$ 为生物酶水溶液配制量, $\text{m}^3$ ;  $n$ 为保证系数;  $r$ 为堵塞半径, $\text{m}$ ;  $h$ 为油层厚度, $\text{m}$ ;  $\phi$ 为孔隙度,%。

隔离液用量要求在环空或油管中高度不低于200 m;生物酶体积分数为4%~8%;注入排量0.2~1.0  $\text{m}^3/\text{min}$ ;注入压力 $\leq$ 电缆承压值;注入方式为不动管柱,油管、环空均可注入;关井时间3~4 d。

### 4.3 工艺流程

#### Process flow

注入顺序:隔离液—生物酶—隔离液—顶替液。做好现场生物酶解堵作业的分工与协作。

### 4.4 典型实例

#### Typical example

生物酶解堵在南海西部海域已实施了2口井,均取得成功,下面以HND-2-A9井为例,详细阐述。

4.4.1 HND-2-A9井生产简介 A9井完钻井深1776 m(TMD),完钻垂深1403 m,人工井底1742 m。下泵:P540-OG2000,200  $\text{m}^3/\text{d}$ ,800 m,83级。该井见水后,含水率快速上升,日产油量快速下降,共产油 $24.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,产气 $176.55 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,产水 $46.54 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。作业前含水为86.9%,产油量71  $\text{m}^3/\text{d}$ ,产液量595  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

4.4.2 HND-2-A9井工艺设计 该井设计用阿波罗酶,配制生物酶用水为生产水样或自来水,依据经验公式 $V=\pi r^2 h \phi$ ,处理半径为1.8 m,计算解堵液用量为60  $\text{m}^3$ 。阿波罗酶原液用量为 $60 \times 4\%=2.4 \text{ m}^3$ 。

解堵液配制:2.4  $\text{m}^3$ 阿波罗酶+57.6  $\text{m}^3$ 水。注入方式为油管注入。

工艺参数:地层破裂压力20.57~21.37 MPa,油层垂直深度1300 m,管柱摩阻5 MPa,最大泵压12 MPa,因此设计施工泵压小于10 MPa;施工排量0.5~1.0  $\text{m}^3/\text{min}$ 。

#### 4.4.3 HND-2-A9井施工程序

- (1)钢丝作业捞出Y堵;
- (2)采油树及地面施工管线试压15 MPa,不刺不漏为合格;
- (3)泵注程序:正挤柴油15  $\text{m}^3$ ,然后正挤阿波罗酶解堵液60  $\text{m}^3$ ,最后顶替生产水(或自来水)28  $\text{m}^3$ ;
- (4)钢丝作业投Y堵,70 h后起泵生产,生产正常后测压力恢复。

#### 4.4.4 HND-2-A9井资料录取

(1)在施工过程中需录取注生物酶的准确用量、关井反应时间以及挤注过程中的参数,包括:施工压

力、排量;作业开始、停止时间;其他异常情况。

(2) 挤生物酶施工前后 A9 井的产液(油)量、油压、含水,返排生物酶完成后稳定生产制度 1 周,记录产液(油)量、油压、含水。

4.4.5 HND-2-A9 井生物酶解堵效果评价 A9 井生物酶解堵后表皮因子由 66.7 降到 49.2,生产压差由 3.9 MPa 降到 3.5 MPa,采液指数由  $165 \text{ m}^3 / (\text{d}\cdot\text{MPa})$  上升至  $190 \text{ m}^3 / (\text{d}\cdot\text{MPa})$ ,流动效率由 13% 提高到 16%。实现日增油  $16 \text{ m}^3$ 。

WZH-4-A3 井通过注生物酶,表皮因子由 92 下降到 10;解堵前采液指数为  $30 \text{ m}^3 / (\text{d}\cdot\text{MPa})$ ,解堵后采液指数上升为  $171 \text{ m}^3 / (\text{d}\cdot\text{MPa})$ ,日增油  $30 \text{ m}^3$ 。根据生产历史以及产能测试情况进行表皮因子分解、堵塞机理研究,分析认为该井以采出液乳化和近井地带润湿性转变为主要伤害,颗粒堵塞次之,再根据堵塞机理认识进行解堵设计,认真组织实施,记录好实施资料和取好评价资料,评价措施效果和提出相应增产措施。生物酶解堵实际效果表明,对井堵塞机理认识正确,解堵措施工艺恰当。

## 5 结论

### Conclusions

(1) 阿波罗酶和 SUN 酶热稳定性都好,阿波罗酶含有活菌,能够降低地层水表面张力性及油/水界面张力,改善岩石润湿性,洗除原油重质组分和钻井滤

液造成的污染。

(2) 通过生物酶解堵选井原则分析,设计了施工参数和工艺实施流程,并运用于油田,生物酶解堵实施效果好,值得类似油田借鉴。

参考文献:

References:

- [1] 孙应力,聂淑兰. 酶在油气田生产中的新用途 [J]. 世界石油工业, 2000, 7(5): 15-17.  
SUN Yingli, NIE Shulan. New application of enzyme in oil and gas field production [J]. World Oil Industry, 2000, 7(5): 15-17.
- [2] 王渊,李兆敏,李宾飞,等. 生物酶改变岩石表面润湿性实验研究 [J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(1): 71-72.  
WANG Yuan, LI Zhaomin, LI Binfei, et al. Experimental research on the changing wettability of rock surface using biological enzyme [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2005, 12(1): 71-72.
- [3] 姜国文,董伟,岳天明,等. 生物酶强化采油技术的研究 [J]. 沈阳化工学院学报, 1995, 9(2): 146-152.  
JIANG Guowen, DONG Wei, YUE Tianming, et al. Study on intensifying recovery of crude oil with biological enzyme [J]. Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology, 1995, 9(2): 146-152.

(修改稿收到日期 2008-08-11)

[编辑 付丽霞]

(上接第 95 页)

tion of production and water ratio changing law of polymer-drive[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2002, 26(1): 97-100.

- [3] 赵军,夏宏泉,刘红歧. 基于 BP 神经网络的油气产量历史预测 [J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(2): 23-26.

ZHAO Jun, XIA Hongquan, LIU Hongqi. Prediction of oil/gas history based on neural network [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1998, 20(2): 23-26.

- [4] 孔祥亭,唐莉,周学民. 聚合物驱开发规划指标预测方法研究 [J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(5): 46-49.

KONG Xiangting, TANG Li, ZHOU Xuemin. Prediction method for the planning indexes of polymer flooding devel-

opment [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development In Daqing, 2001, 20(5): 46-49.

- [5] 蔡季冰. 系统辨识 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1991.

CAI Jibing. System identification [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1991.

- [6] 夏天长. 系统辨识 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1983.

XIA Tianchang. System identification [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1983.

(修改稿收到日期 2008-07-18)

[编辑 付丽霞]