

# 低渗透油田生物酶降压增注技术

才艳华

(大庆油田有限责任公司第十采油厂, 黑龙江 大庆 166405)

**摘 要** 生物酶能将岩石表面的润湿性转变为亲水性,使原油从岩石颗粒表面脱落,降低残余油饱和度,可有效改善低渗透油田注水压力高、油井受效差的问题,提高驱油效率。通过洗油能力评价、界面张力测定、表面吸附性评价、腐蚀性检测、生物酶降压能力等室内模拟实验对生物酶性能进行评价,结果表明:生物酶浓度在 2.0% 时,界面张力较低,注入压力平均降幅为 51.4%,并且对 N80 钢质不具腐蚀性,综合考虑多方面因素,最终决定注入生物酶体积倍数选为 0.006PV。现场试验选取了 A 油田试验区块的 6 口水井极其连通的 24 口油井作为试验井组,累计注入生物酶原液 270t,酶溶液总注入量为 11422m<sup>3</sup>。试验一年以后,水井注水压力下降,视吸水指数上升,层间吸水状况得到改善;连通油井产量略有回升,综合含水保持稳定,地层压力恢复速度明显提高,并且增加了新的采出油位,累计增油 3519t,阶段采收率提高了 0.38%,为解决外围三类储层注水开发无法建立有效驱替体系的问题进行了有益的探索。

**关键词** 低渗透油田 生物酶 降压增注 试验效果

## 1 前言

低渗透油田储层、原油物性差,油水井间憋压严重,水井注入压力高,油井受效差,制约了区块的有效开发。而用于石油开采的生物酶能将岩石表面的润湿性转变为亲水性,使原油从岩石颗粒表面脱落,降低残余油饱和度,从而提高驱油效率<sup>[1,2]</sup>。因此,开展了低渗透油田生物酶降压增注现场试验。

## 2 生物酶的主要成分及作用机理

### 2.1 主要成分

生物酶是采用基因工程、细胞工程等现代技术提取的一种以蛋白质为基质的生物催化剂。用于石油开采的生物酶是由多种酶筛选组成的复合酶体系,其组成主要为复合生物酶、生物活性物、生物提取物、水性分散剂、稳定剂等。

### 2.2 作用机理

生物酶洗油过程是一个可循环的生物反应过程,它起到催化剂的作用,具体过程分 3 个阶段:①生物酶与原油和固体颗粒的结合体吸附在一起形成酶-油-固体颗粒复合体;②酶油复合体分解为酶-油中间体和固体颗粒;③酶油中间体分解,形成独立的原油与酶,恢复生物酶原状。

生物酶在低渗透、特低渗透油田具有的降压增油机理是消除了原油边界层的影响。

## 3 生物酶基本性能评价认识

### 3.1 洗油能力评价

将 A 油田油泥分别放入不同浓度的生物酶溶液中观察洗油效果。生物酶溶液与油泥充分混合接触后,原油从泥土表面分离下来,形成油滴状或团状浮起。当实验时间达到 5h、生物酶溶液浓度为 0.6% 以上时,洗油率达到 72% 以上,说明生物酶有较好的洗油能力<sup>[3]</sup>。

### 3.2 界面张力测定

由于生物酶分子链由极性和非极性官能团组成,具有类似表面活性剂分子的结构。当生物酶分子的亲油基和亲水基部分在油水界面或固液界面吸附后,改变了界面活性或油砂表面的润湿性<sup>[4]</sup>。应用界面张力仪对 A 油田油样进行了不同酶浓度条件下的界面张力测定。从测试结果可以看出,酶的浓度在 0.5%~2% 附近界面张力较低,随着浓度的增加,界面张力逐渐变大(见表 1)。

表 1 生物酶溶液浓度与原油界面张力关系统计表

酶浓度, %	0.20	0.50	2.00	6.00	10.00
界面张力/(mN·m <sup>-1</sup> )	0.488	0.201	0.252	0.715	0.950

作者简介:才艳华,工程师,2002 年毕业于大庆石油学院采油工程专业。 E-mail: caiyh@petrochina.com.cn

### 3.3 表面吸附性评价

注入 1PV 浓度为 2.0% 的生物酶溶液，驱替 2PV 水后检测出口端酶蛋白含量，检测单位孔隙体积吸附量为 441.54 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ，在此吸附量的前提下能够有效降低残余油饱和度(见表 2)。

表 2 生物酶溶液吸附量检测表

项目	数据
2%生物酶溶液中酶蛋白含量/ $(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	787.54
驱替 2PV 后溶液中酶蛋白含量/ $(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	173.00
注入酶蛋白量/ $\mu\text{g}$	4347.22
产出酶蛋白量/ $\mu\text{g}$	1909.92
单位孔隙体积吸附量/ $(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	441.54

### 3.4 腐蚀性检测

在挂片腐蚀仪反应器内，将 N80 试片置于酶溶液中，反应 4h 后，干燥称重。通过对比试片实验前、后质量变化可以看出，生物酶溶液对 N80 钢质不具有腐蚀性(见表 3)。

表 3 生物酶溶液腐蚀性检测数据表

试片号	721	722	723	
试片长/mm	50.03	50.02	50.03	
试片宽/mm	10.02	10.01	10.01	
试片厚/mm	3.00	3.00	3.01	
试片质量/g	腐蚀前	11.7447	11.7445	11.7446
	腐蚀后	11.7447	11.7445	11.7446
浸泡时间/h	4	4	4	
腐蚀速率/ $[\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$	0	0	0	

### 3.5 注入方式对注入压力的影响

实验采取连续注入与分段塞注入两种模式，选取编号为 T-1 和 T-3 的岩石作为样品，其参数见表 4。整个实验过程中压降趋势基本相同，表明注入方式对生物酶降压能力的影响不大(见图 1)。

表 4 岩心参数表

岩心号	长/cm	直径/cm	孔隙度, %	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
T-1	8.66	2.50	13.6	33.8
T-3	9.01	2.50	12.9	32.9

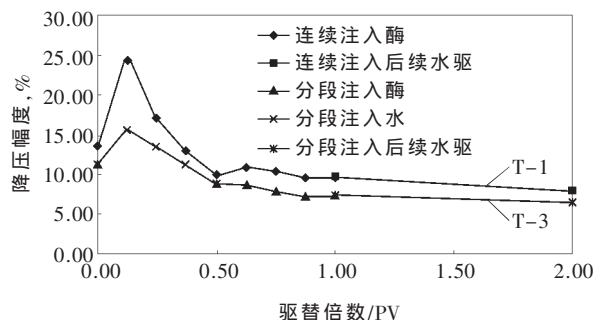


图 1 注酶压力下降百分数与注入 PV 数的关系

### 3.6 生物酶降压能力

应用 0.5%~5.0% 范围内的不同浓度生物酶溶液对 6 块人造岩心和 3 块天然岩心进行了降压实验。当生物酶浓度为 2.0% 时，注入压力明显降低，压力下降幅度 22.6%~72.7%，平均降幅达 51.4%，确定现场注入采用 2.0% 生物酶浓度(见表 5)。

表 5 室内岩心生物酶降压实验结果

岩心编号	气测渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	酶浓度, %	水驱压力梯度/ $(\text{atm}\cdot\text{cm}^{-1})$	注酶压力梯度/ $(\text{atm}\cdot\text{cm}^{-1})$	注酶压力梯度下降, %	后续水驱压力梯度/ $(\text{atm}\cdot\text{cm}^{-1})$	后续水驱压力梯度下降, %
人造 D-6	33.7	0.5	0.234	0.190	18.8	0.158	32.6
人造 D-3	33.7	1.0	0.215	0.128	40.5	0.136	36.7
人造 D-4	33.7	2.0	0.418	0.114	72.7	0.189	54.8
人造 D-5	33.7	5.0	0.358	0.105	70.3	0.154	57.0
人造 D-2	33.7	5.0	0.382	0.075	80.3	0.234	38.7
人造 2 号	58.0	5.0	0.248	0.179	27.8	0.163	34.3
天然 2 号	73.0	2.0	0.889	0.688	22.6	0.296	66.7
天然 5 号	33.8	2.0	0.946	0.334	64.7	0.541	42.8
天然 6 号	6.3	2.0	3.790	2.160	45.6	2.460	35.1

注：表中 atm 为 101325Pa。

根据室内实验结果，综合考虑经济因素和现场操作方便，结合其他油田试验选用参数，注入生物酶体积倍数选择 0.006PV。

## 4 试验区与对比井区概况

选择 A 油田试验区块的 6 口水井及其连通的

24 口油井作为试验井组。

试验井组含油面积为 1.26 $\text{km}^2$ ，油层平均有效厚度为 11.5m，有效孔隙度为 15.0%，空气渗透率为 4.2 $\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，原始含油饱和度为 54.0%，油层温度为 64.5 $^{\circ}\text{C}$ ，饱和压力为 5.34MPa。

井组和 区块增压注水井组两个对比区,通过对比来分析试验效果。

同区块注水开发井组为与试验区相邻的 4 注 12 采对比井组,含油面积为  $0.67\text{km}^2$ ,平均单井有效厚度为  $16.2\text{m}$ ;注水井平均注水压力为  $14.3\text{MPa}$ ,单井日注水  $19\text{m}^3/\text{d}$ ;连通油井 12 口,出油井 9 口,日产油  $16.1\text{t}/\text{d}$ ,综合含水  $12.0\%$ 。

区块增压注水井组,含油面积为  $1.35\text{km}^2$ ,地质储量为  $84.97 \times 10^4\text{t}$ ,储层孔隙度为  $16.5\%$ ,渗透率为  $9.0 \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。共有油水井 20 口,其中注水井 6 口,增压前平均日配注  $18\text{m}^3/\text{d}$ 、日实注  $13\text{m}^3/\text{d}$ 、注水压力为  $13.3\text{MPa}$ 。该井区于 2002 年 6 月至 2003 年 6 月期间增压注水。

## 5 试验效果分析

试验区于 2007 年 12 月 26 日开始现场注入生物酶,于 2008 年 4 月 20 日全部注完,累计注入生物酶原液  $270\text{t}$ ,酶溶液总注入量为  $11422\text{m}^3$ 。

### 5.1 水井注入状况分析

试验井注入生物酶已达 22 个月,在注入生物酶第一年时间内,平均注水压力整体上呈先升后降的趋势;一年后,注水压力有所回升,目前与试验前基本持平;试验后全部水井均能够完成配注,平均单井日注水量增加  $6\text{m}^3$ ,累计增注  $2.304 \times 10^4\text{m}^3$ ;视吸水指数由措施前的  $0.84\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$  提高到目前的  $1.23\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ,升高了  $0.39\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。

#### 5.1.1 水井注水压力下降,视吸水指数上升

试验区的 6 口水井中有 3 口井降压效果明显。这 3 口井试验前后均能完成配注,试验前半年内注水压力基本保持不变,之后压力逐渐下降,试验一年后降至最低值  $14.5\text{MPa}$ ,下降  $0.5\text{MPa}$ ,之后压力略升,目前注水压力为  $15.0\text{MPa}$ ,与试验前持平,视吸水指数由  $1.31\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$  升至  $1.33\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。与同区块水驱开发井组对比,对比井组平均注水压力由  $14.3\text{MPa}$  上升到  $14.9\text{MPa}$ ,上升了  $0.6\text{MPa}$ ,视吸水指数由  $1.33\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$  降至  $1.31\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ,下降了  $0.02\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ,表明生物酶的注入对提高油层的吸水能力起到了较为积极的作用。

试验区的 6 口水井中有 3 口井增注效果明显。试验前平均注水压力为  $15.8\text{MPa}$ ,平均单井日实注  $6\text{m}^3/\text{d}$ ,平均视吸水指数仅为  $0.36\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。采取增压注酶措施半年内,平均日实注增加到  $18\text{m}^3/\text{d}$ ,

日增注  $12\text{m}^3/\text{d}$ ,平均注水压力上升至  $16.9\text{MPa}$ ,上升了  $1.1\text{MPa}$ ,视吸水指数增加到  $1.08\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。之后,在保持注水量不变的情况下注水压力持续下降。试验一年后注水压力降至  $15.7\text{MPa}$ ,比试验前下降了  $0.1\text{MPa}$ 。进入 2009 年后,注水压力均呈上升趋势,目前平均注水压力为  $16.1\text{MPa}$ ,视吸水指数达到  $1.14\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ,3 口井累计增注  $2.304 \times 10^4\text{m}^3$ 。

与 区块增压注水井组相比,3 口增注井注水压力呈先升后降趋势,试验一年后注水压力下降了  $0.1\text{MPa}$ ,目前升高了  $0.3\text{MPa}$ ,平均日实注增加  $12\text{m}^3/\text{d}$ ,视吸水指数增加  $0.78\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。区块增压注水井组试验后虽然满足了对水井的增注需求,但水井注入压力持续上升,一年内由  $13.4\text{MPa}$  上升到  $14.8\text{MPa}$ ,上升值达到  $1.4\text{MPa}$ ,视吸水指数仅增加  $0.24\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。这也表明,生物酶的注入起到了降压增注的效果。

#### 5.1.2 层间吸水状况得到改善

通过水井注生物酶前后吸水剖面资料对比来看,水井层间吸水差异变小。年度对比吸水层数百分数分别增加  $12.5\%$ 、 $25.0\%$ ,砂岩厚度吸水百分数分别增加  $11.0\%$ 、 $23.0\%$ ,有效厚度吸水百分数分别增加  $12.7\%$ 、 $26.0\%$ 。注入水的波及体积增大,剩余油得到有效驱动。

### 5.2 连通油井生产状况分析

#### 5.2.1 油井产量略有回升,综合含水保持稳定

试验区共有油井 24 口,其中包括 5 口长关井,目前正常生产 19 口井,扣除 4 口措施井后,对比其余 15 口井。

应用可对比井试验前一年的生产数据,通过回归得到试验井组递减规律,年递减率为  $14.3\%$ ,平均月度递减幅度为  $1.2\%$ ,并根据趋势对不采取生物酶措施的产油情况进行了预测。通过预测产油量与实际产油量的对比看,对比井在未采取其他调整或增产措施的情况下,产量下降趋势得到控制并逐渐回升,2008 年年度对比日产油由  $27.9\text{t}/\text{d}$  上升到  $30.7\text{t}/\text{d}$ ,上升了  $2.8\text{t}/\text{d}$ ,综合含水保持稳定。

2009 年以来,油井产量开始回落,前 10 个月日产量由  $30.7\text{t}/\text{d}$  下降到  $25.4\text{t}/\text{d}$ ,下降了  $5.3\text{t}/\text{d}$ ,平均月度递减幅度为  $1.1\%$ 。截至目前试验区累计增油  $3519\text{t}$ ,阶段采收率提高了  $0.38\%$ 。相对于同区块注水开发井组油井产量的持续递减,生物酶试验区控

制产量递减见到了较好效果,实现了控制产量递减、提高阶段采出程度的目的。

### 5.2.2 地层压力恢复

试验前、后分别对连通的2口油井进行压力恢复测试,测井资料显示,试验后地层压力不断上升,

表明生物酶具有的降压增注的特性使油井的地层压力得到恢复。其中,井1试验前2年时间地层压力上升值仅为0.37MPa,试验后近7个月的时间地层压力上升了0.65MPa,压力恢复速度明显提高,这也验证了生物酶提高驱替效率的作用(见表6)。

表6 检测井测压情况

井号		试验前		试验后			
井1	测压时间	2005-11-23	2007-10-28	2008-04-02	2008-05-26	2008-08-20	2008-11-10
	压力/MPa	3.78	4.15	4.12	4.39	4.68	4.77
井2	测压时间		2007-11-29	2008-02-29		2008-08-20	2008-11-10
	压力/MPa		10.57	10.87		12.5	12.67
平均			7.36	7.5		8.59	8.72

### 5.2.3 油井采出液生物酶成分检测

为检测生物酶前缘推进速度,采取了对连通油井采出液定性检测生物酶成分的方法。结果表明,取样井在试验半年后见到了生物酶成分,生物酶从水井驱替到油井顺利采出,达到作用油层实现均匀推进,在油层中起到了剥离油膜和驱动剩余油的作用,形成了驱油的动力,实现提高采收率的目的。

2009年3月,对生物酶试验区生产的19口油井都进行生物酶成分检测,19口井均未见到生物酶成分,说明注入油层的生物酶已全部采出。

### 5.2.4 采出液原油物性和矿化度发生明显变化

试验前后,选择试验区的3口油井进行了油样全分析。分析结果显示,原油黏度和沥青质含量上升,说明生物酶驱油剂起到了疏通油层孔道、拓展未动用油层的作用,有效地扩大了波及体积,提高了驱油效果。采出液中氯离子含量及矿化度均有明显升高趋势,表明原来水驱未动用的油层被生物酶驱动,增加了新的采出油部位,改善了油层的动用状况(见表7)。

表7 油样全分析资料

测试项目	50℃黏度/ (mPa·s)	沥青质 含量,%	氯离子含量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	矿化度/ (mg·L <sup>-1</sup> )
试验前	27.12	0.40	489.87	1680.36
试验后	31.53	2.74	585.27	1945.29

## 6 结语

① 试验区块水井注水压力整体上呈先升后降的趋势,试验后全部水井能够完成配注要求,水井吸水能力得到加强,说明生物酶驱油剂在低渗透油

藏具有降压增注的效果;从吸水剖面测试情况看,水井层间吸水差异得到改善,增加了新的受效层。

② 试验区块油井产量下降趋势得到控制并逐渐回升,截至目前累计增油3519t,同时地层压力得到恢复,证明生物酶起到了释放储层岩石颗粒表面碳氢化合物和提高流体渗流能力的作用,提高了采油速度。

③ 油井采出液生物酶检测和油样全分析表明,生物酶驱油前缘能够均匀推进,可以剥离油膜,驱动剩余油,拓展未动用储量;从采出液的氯离子含量及矿化度检测可以看出,增加了新的采出油部位,改善了油层的动用状况。

④ 生物酶在三类区块的应用取得了较好的降压增注和提高采收率的效果,为解决外围三类储层注水开发无法建立有效驱替体系的问题进行了有益的探索。

### 参考文献:

- [1] 冯庆贤,汪娟娟,柳敏,等.改性生物酶驱油先导试验[J].断块油气田,2008,16(4):37-39.
- [2] SIDDIQUI M A, NASR-EL-DIN H A, Evaluation of Special Enzymes as a Means to Remove Formation Damage Induced by Drill-in Fluids in Horizontal Gas Wells in Tight Reservoirs [J].SPE Production & Facilities, 2005, 20(3):177-184.
- [3] 杨倩云,郭保雨,沈丽,等.生物酶可解堵钻井液的室内研究[J].钻井液与完井液,2009,26(6):1-4.
- [4] 孔金,李海波,周明亮,等.SUN生物酶解堵剂及其在胜利海上油田的应用[J].油田化学,2005,22(1):23-24.

(编辑 常雪红)

## Technique of Pressure Decreasing and Injection Increasing by Biological Enzyme in the Low Permeability Oilfield

Cai Yanhua

(No.10 Oil Production Plant, Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing Heilongjiang 166405)

**[Abstract]** Biological enzyme can make residual oil saturation drop for turning wettability of rock surface to water wet and making crude oil fall off from rock particles surface. It also can solve the problems of high injection pressure and poor response of the oil well in the low permeability oilfield and then enhance displacement efficiency. The properties of the biological enzyme were evaluated through the laboratory experiments on displacement efficiency, interfacial tension, and characteristic of surface adsorption, corrosion behavior and depressurization of the biological enzyme. The results show that when the concentration of the biological enzyme is 2.0%, the interfacial tension is low and injection pressure drops by 51.4% averagely, and it has no corrosiveness for N80 steel. So 0.006PV of the biological enzyme should be injected according to the comprehensive factors. In the field, six injection wells and their connected 24 oil wells make up of the test well group in the tested block of A oilfield. Cumulative injected original enzyme is 270t and total injected enzyme solution is 11422m<sup>3</sup>. After one year, injection pressure dropped and apparent water injectivity index rose, and interbedded injectivity behavior was improved in the injection wells. In the connected oil wells, oil production rose a little and composite water cut has no change and rate of formation pressure recovery increased obviously. And more oil was produced with 3519t of cumulative incremental oil production and interval rate of production enhanced by 0.38%. It may help to establish an efficient displacement system in water flooding in peripheral three-type reservoirs.

**[Keywords]** low permeability oilfield; biological enzyme; pressure decreasing and injection increasing; experiment result

### · 能源知识 ·

## 震动发电(二)

由于因诺瓦科技公司的这项发电技术不产生任何额外污染,且植入沥青内的压电晶体的使用寿命一般可达30年,路面改造成本也不高,所以开发前景广阔。近年来,许多国家开始关注并投入于类似技术的研究。

美国科学家曾在都灵火车站进行了一项实验,他们制造了一个发电机原型,利用人的脚步移动发电。他们表示,相当数量的人的脚步移动足可以产生牵引一辆火车的电量。

日本的音力发电公司也开发出一种“发电地板”。在2008年圣诞节前夕,研究人员在东京涉谷火车站的人行道上铺设了四块地板。当行人从上面踩过时,地板就可以进行发电,并为圣诞灯饰提供电力供应。据测定,平均每个人从45cm<sup>2</sup>的地板上走过两次就可以产生每秒0.5W的电能。

全世界第一家通过跳舞发电的迪厅已经在荷兰鹿特丹开业。在这家名为“瓦特俱乐部”的迪厅,舞池中大约1/3的用电是跳舞的宾客们自己制造的。

(供稿 冷风)