

低频脉冲波强化采油技术研究及试验

宋建平 陈建华 刘斌

(河南石油勘探局)

摘要 本文对低频脉冲波的技术性能、作用机理、对岩层岩心的裂缝效应、改善孔隙结构效应以及对流体的作用等方面进行了理论探讨和室内及现场试验。阐述了低频脉冲强化采油机理主要在于能使近井地带形成微裂缝网,疏通储层孔隙,改善孔隙中流体分布状态,降低原油粘度等。通过现场试验,证实了低频脉冲波强化采油技术可用于油水井除垢、降粘、解堵、增产增注等方面,而且该技术投资少、见效快、工艺简单,具有广阔的推广应用前景。被总公司新技术推广中心评为1994年油井增产优秀项目。

主题词 低频 脉冲 低频震荡 作用 强化采液 解堵 增注 机理 研究 试验

作者简介 宋建平,1967年生。1987年毕业于华东石油学院炼制系实验技术专业。陈建华,1965年生。1990年毕业于石油大学(华东)自动化系应用电子技术专业。刘斌,1966年生。1990年毕业于西北大学地质系石油及天然气地质专业。以上三位现在勘探开发研究院采收率室从事提高原油采收率的研究及试验工作。

利用各种声波振动作用处理油层技术源于50年代,迅速发展于70年代,到80年代得到进一步发展和完善,主要是应用超声波和水力脉冲波处理近井地带,在强化采油方面起到很重要的作用。前苏联和美国最近5年来,已着手研究利用振动法改造整个油层的可能性,成功地制造了高能震源,并且在理论研究方面取得了进展。提出了改造整个油层的振动法,可以大大提高处于开发中、后期油田的原油采收率。河南油田研究院经过5年的室内实验研究,于1993年10月开展了低频脉冲波强化采油技术的现场试验,并取得了明显的增油降水效果。

一、低频脉冲波的主要技术性能及频谱特性

低频脉冲波强化采油装置是由地面大功率震源及利用电缆传输到井下的声振荡器构成。具有瞬间激发能量高,在脉冲波振荡中心的瞬时声场强度高达 $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。其频谱特性见图1、图2。

从图中可见,脉冲波频率主要在15Hz以内,能量分布在50Hz以内,集中在15Hz以下。脉冲波在地层中的传播,实际上是能量在地层中的传播,因此,其声波频率、能量及其在地层中的分布和衰减是至关重要的因素。脉冲波属纵波类型,其振动沿径向传播。波源和处理对象(含油砂岩)确定后,脉冲波作用范围还与声波频率有关,频率愈高,能量在地层中衰减愈快。从文献[1]可知,地层对20kHz超声波的衰减系数高达6.85,而对100Hz低频声波的衰减系数仅为0.0246。改进后的低频脉冲波强化采油装置频率在15Hz以内,地层对它的衰减系数仅为0.00268。根据声源级与辐射声功率和点声源传播损失公式^[1],低频脉冲波有效影响范围可

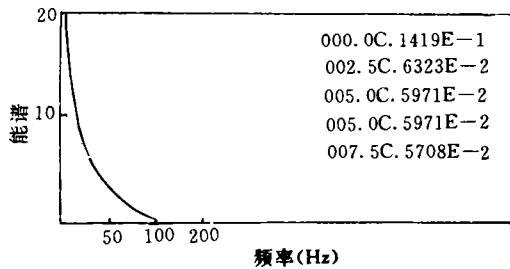


图1 低频脉冲波能谱图

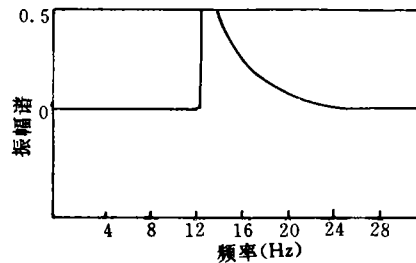


图2 低频脉冲波频谱图

达 200m 以上。根据实验结果作出声波频率与衰减系数的关系图(见图 3)。

从图 3 可见,在双对数坐标图中,地层对声波的衰减系数与声波频率成直线关系。

二、低频脉冲波作用机理的初步研究与探讨

1. 低频脉冲波对油层岩心作用机理实验

(1)产生宏观裂缝效应。观 27 井致密砂岩岩石(未加环压)在低频脉冲波处理 30min 后,不仅产生了分叉的裂缝,而且岩心内象蜘蛛网似的微裂缝网也清晰可见。

(2)改善岩心微观孔隙结构。将同一块岩心样品(加环压 2MPa 处理),分声波处理前后作成铸体薄片,进行单偏光显微镜下观察及图象分析。

显微镜下观察到,非常致密的观 27 井岩心和较致密的 S213 井粉细砂岩岩心,处理后出现了微裂缝,主要沿颗粒边缘及片状矿物解理缝隙分布。而本来渗透性较好的资 2 井中一粗砂岩岩心及 10-196 井砾状砂岩岩心,处理后粒间杂质含量减少,喉道变大,孔隙连通性增加,孔隙结构变好。

从低频脉冲波处理后的图象分析可知,资 2 井、S213 井及 10-196 井,横向(指与声波传播方向垂直的方向,即岩心的垂向)和纵向(与声波传播方向一致的方向,即岩心水平方向)各项物性参数明显变好,纵向变化尤为明显。说明声波主要沿岩心水平方向作用,形成微裂缝,改善水平方向的孔隙连通状况。

资 2 井和 10-196 井纵向上孔宽分别增加 $14\mu\text{m}$ 和 $33\mu\text{m}$ 。更为明显的是资 2 井纵向上,孔分布区间由处理前的 $0\sim 43\mu\text{m}$,扩大到处理后的 $43\sim 87\mu\text{m}$ 。说明许多小孔隙被扩大,从而改变了孔径的众数分布区间。

连通指数、储层指数处理后普遍增大,资 2、10-196、S213 井岩心连通指数和储层指数分别增大 $4\%\sim 11.5\%$, $24.3\%\sim 34.3\%$ 。

2. 低频脉冲波对流体的作用 低频脉冲波处理后,使稠油粘度下降 $17\%\sim 25\%$,与碱水

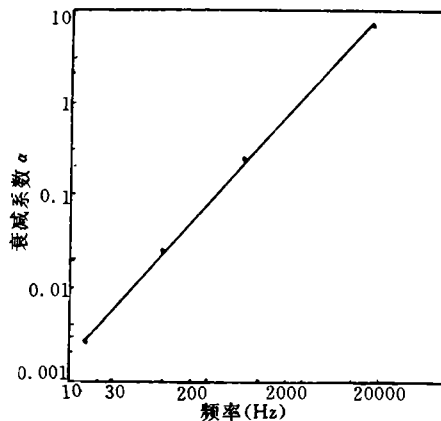


图3 饱和砂岩地层声波衰减系数与频率关系图

乳化相结合,形成水包油型乳状液的粘度 $\leq 10\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

3. 低频脉冲波强化采油作用机理

(1) 低频脉冲波对油层岩石的造缝作用。低频脉冲波可使岩心形成网状微裂缝和少量宏观裂缝,这里从波动力学、材料断裂力学和岩石力学等方面来分析解释。强大的低频脉冲波由于在地层中衰减系数小,传播距离远,就给地层岩石及孔隙介质内的油水较强的冲击振动力,并使孔隙中流体产生加速度。以理想状态的平面波为例,脉冲波为中心的周围物质加速度 a 有如下关系式

$$a = \frac{du}{dt} = \omega u$$

$$u = P/\rho c$$

$$\omega = 2\pi f$$

则 $a = (2\pi f P)/\rho c$

式中 f —— 声波频率,Hz; P —— 声波压力,MPa;
 ρ —— 介质密度; c —— 声波传播速度;
 ρc —— 单位面积的声阻抗。

低频脉冲波主频率 $f=10\text{Hz}$,中心声波压力 $P=600\text{MPa}$,岩石介质的声阻抗 $\rho c=1.4\text{mkgs}$,则 $a=26\ 900\text{m/s}^2=2\ 690\text{g}$,显然,脉冲振动的周期性加速度比地层岩石及其流体的重力加速度大2 690倍。这样,就使所波及到的地层岩石及流体的质点以极大的加速度作激烈振动。

对于油层岩石来说,由于长期的地质力学作用,存在断层、裂缝、层理及微裂隙,可把油层岩石视为非连续均匀材料(介质),从而可应用材料力学和断裂力学理论来分析脉冲波的造缝机理。材料力学和断裂力学指出,在高速加载(冲击)条件下,材料的断裂强度明显降低,最大应力值一般低于静载作用下的抗拉强度。在强大的脉冲波的冲击载荷作用下,地层岩石的疲劳强度远低于静水柱压力载荷的疲劳强度,这种脉冲振动作用使得非连续均匀的岩石产生相对撕裂的剪切应力,当超过岩石的抗疲劳强度,就会产生微裂缝或宏观裂缝,且可以高速向前扩展,这种扩展直至冲击力与岩石的疲劳应力相平衡时,才会停止。由于低频脉冲波可传播到远井地带200m以上还保持一定的作用强度,故可疏导远井地层,产生一系列的解堵、增渗、强化采油及增注效果。

(2) 低频脉冲波对岩石孔隙介质的剪切效应分析。低频脉冲波振动可改变油层孔隙介质中固—液、油—水界面状态及毛管力束缚作用,使油、水重新分布和运移。

油层砂岩包括岩石颗粒、充填粘土矿物、饱和的油气水等复杂的介质体系。它们的密度等物理性质不同,脉冲声波作用时其声阻抗不同,产生的振动加速度和速度各有差异,从而在固—固(粘—胶结物)、固—液、油—水—气相界面上产生剪切应力,声阻抗差异越大(如固体与液体),接触面上剪切应力就越大,结果就出现如下效应:

a. 岩石颗粒表面粘土胶结物被振动脱落;孔喉充填桥状粘土微粒会松动和迁移,解除孔喉道堵塞,扩大孔隙半径,改善孔隙连通性,这为前述的薄片观察及图象分析资料所证实。

b. 改变固—液界面动态,克服岩石颗粒表面对原油的吸附亲合力,使油膜从颗粒表面脱落。

c. 改变孔隙介质中油、水、气界面动态,克服毛管力的束缚滞留效应,并使油珠、油柱状分散的剩余油,重新分布、聚并,便于排驱出来。

d. 降低油水界面张力,国外实验证实⁽²⁾:在声振动场中,油水界面张力降低2~3个数量级,达到 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{N/m}$ 低界面张力驱油界限。

三、室内可行性试验研究

1. 低频脉冲波解除岩心污染堵塞试验 低频脉冲波与超声波解堵对比试验的试验条件为:温度 30°C ;驱替速度 30mL/h ;试验岩心为B123²井(902.2~908.22m);泥浆是魏岗井场加入增粘剂的泥浆。试验结果见表1。

表1 低频脉冲波与超声波解堵试验对比

处理方式	参数	作用时间 (h)	岩心两端压差(MPa)			K_w 恢复率 (%)
			饱和泥浆前	饱和泥浆后	处理后	
低频脉冲波	2次/min,功率200W	1	0.0474	4.60	0.0539	88
超声波	20kHz,功率200W	2	0.021	3.50	0.1030	20

从表1可看出低频脉冲波的解堵性能比超声波强得多,岩心经低频声波和超声波处理后 K_w 恢复率分别为88%和20%,且低频脉冲波作用时间只有超声波的1/4。

2. 低频脉冲波解除油层伤害的试验 油田注水开采所引起的一些地层伤害,包括注入水与地层不配伍,粘土膨胀及注水导致的微粒堵塞(颗粒迁移和注水杂质)等。表2列出了室内模拟试验情况,试验温度 20°C ,驱替速度 30mL/h 。

表2 低频脉冲波解除油层伤害的岩心试验结果

岩心编号	S_{10}	S_{11}	1/3
地层水驱稳定压差 ΔP_0 (MPa)	0.041	0.055	0.066
岩心伤害实验	水敏实验(水化反应)	水敏实验(吸水膨胀)	微粒堵塞(5 μm 5ppm)
岩心伤害过程中水驱平衡时的压差 ΔP_1 (MPa)	0.140	0.243	0.074
脉冲波作用参数	200J2次/min	200J2次/min	200J25次/min
作用时间(h)	4	4	0.4
作用后水驱平衡时的压差 ΔP_2 (MPa)	0.068	0.078	0.066
脉冲波处理后 K_w 与伤害后 K_w 之比($\Delta P_1/\Delta P_2$)(%)	206	316	112
K_w 恢复率($\Delta P_0/\Delta P_2$)(%)	60	70	100

从表2中可看出由于水敏及注入水中的微粒堵塞等造成的岩心伤害,经低频脉冲波处理后的 K_w 为伤害后的112%~316%,能恢复其初始渗透率的60%~100%。

3. 低频脉冲波处理增加岩心渗透率的试验 根据双河油田砂岩储层的岩性特点,进行了粉细砂岩、中—粗砂岩、含砾粗砂岩及砾状砂岩四类岩心及人造胶结岩心的低频脉冲波处理增渗试验。驱替过程中, K_w 变化过程见图4。

试验结果表明,这四类岩心经处理后, K_w 增加的百分率从30%~460%不等;岩性复杂多变的中—粗砂岩和含砾粗砂岩经处理后 K_w 增加幅度较大,岩性较单一的粉细砂岩和砾状砂岩经处理后 K_w 增加幅度较小,岩心渗透性能增加是由于孔喉变大,孔隙连通性变好及沿矿物

解理产生微裂缝的结果。

4. 低频脉冲波增注试验 试验表明,在注入压力基本不变的情况下,在低频脉冲波声场中,水流过岩心的渗流速度增加1倍。如果在注水井中实施此工艺,可在不提高注入压力的条件下,增加单井的注入量。而且由于此脉冲波的纵向传播,可以有选择地处理中、低渗透层或夹层,调整非均质地层的吸水剖面。

5. 低频脉冲波增油降水试验 对S3115井岩心进行了水驱条件下的各种振动处理方式驱替对比,结果见图5。

从图中可见,S3115井岩心振动水驱比单

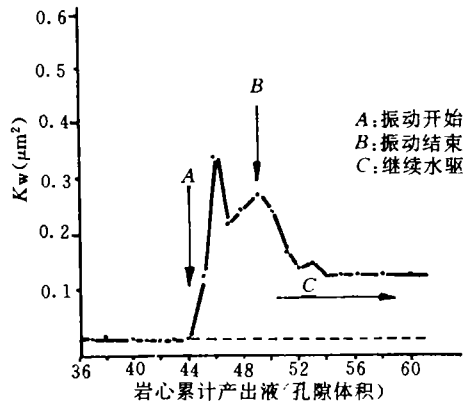
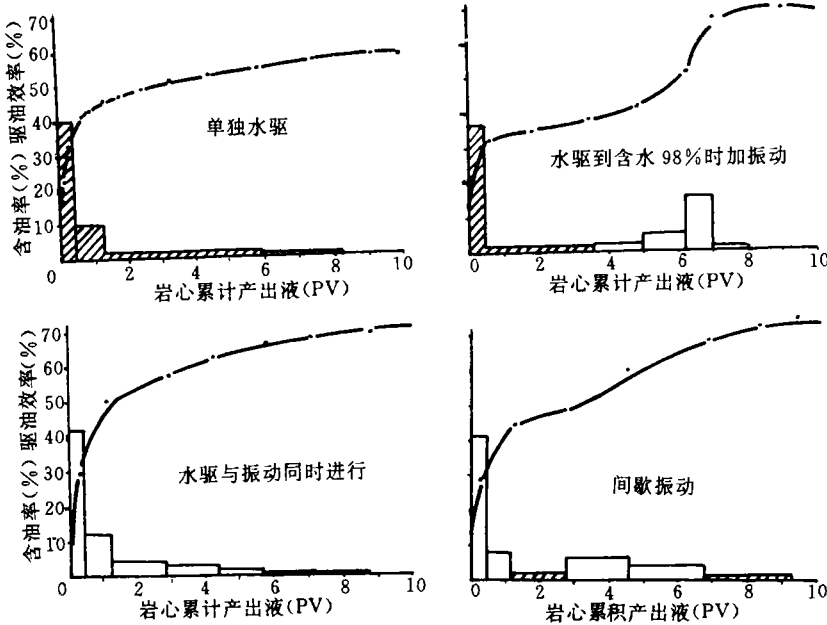


图4 低频脉冲波处理后渗透率变化曲线



图例 ● 驱油效率 ▨ 水驱产油量 □ 水驱+振动产油量

图5 水驱条件下各种振动处理方式驱替试验对比

独水驱最终驱油效率(含水100%)提高17.6%。各种振动方式振动水驱到含水98%时,驱油效率达到64.5%~73%,平均比单独水驱提高19%,振动中含水下降低15%左右。几种振动方式的结果表明,采用间歇振动效果最好,因此在矿场应用中,可以采取多次重复处理的方法;另外,振动开始的时间对振动效果影响不大,从对比图中看出,水驱到高含水与水驱开始振动的效果比较差不多,而在化学驱中,注入化学剂的时机对效果有直接的影响。

四、低频脉冲波强化采油现场试验

1993年10月,低频脉冲波强化采油技术在河南古城油田B125区块的4305井和125'井

进行了试验,取得了明显的增油效果。

1. 试验井基本情况 B125 区块位于古城鼻状构造带的中部,含油地层为下第三系核桃园组第三段,油层埋深 363~718m,含油层位多,以薄层为主,储层岩性主要是细粉砂岩,胶结相对较好,盖层为泥、页岩,圈闭好。该区块弹性能量不足,能量补充缓慢,油稠,结蜡严重,近井地带渗流阻力大,油井产量低。试验井的孔隙度 27.13%~30.30%,渗透率 $596\sim 2\,710\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,含油饱和度 26.04%~51.67%。

2. 施工工艺 低频脉冲波处理系统示意图见图 6。图中:1. 大功率震源;2. 电缆;3. 振荡器;4. 绞车;5. 滑轮。

处理程序为作业取出油管,探砂面(如砂柱高需冲砂),热洗井,下电缆到油层段或油层附近。125' 井下到 529m,油层上部,单次脉冲振动 220 次,每次间隔 100s;4305 井下到 532m,自下往上每隔 0.5m 为一点,每点脉冲振动 55 次,4 点共 220 次,每次间隔 100s。

3. 试验效果 两口试验井 4305、125' 井以及周围受益井(井距约 200m),在试验后的 4 个月内共增油 933t。两口试验井平均日增油 2 倍以上,降低含水 10% 左右。见 4305、125' 井试验前后采油曲线对比图(见图 7、图 8)。

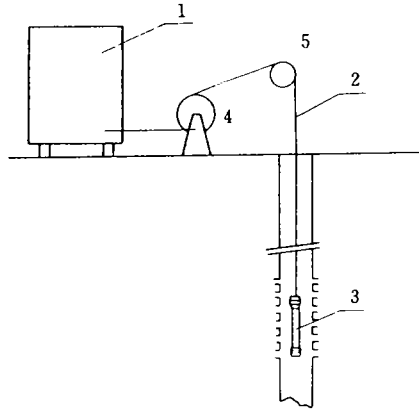


图 6 低频脉冲波处理系统示意图

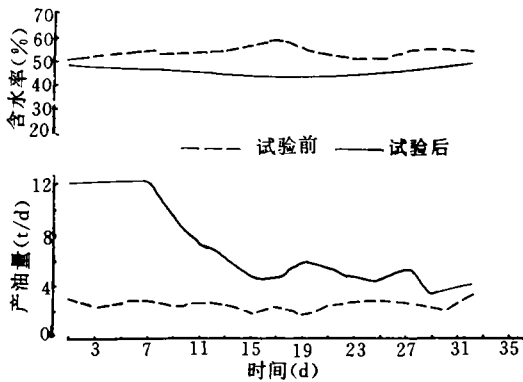


图 7 4305 井产量含水对比曲线

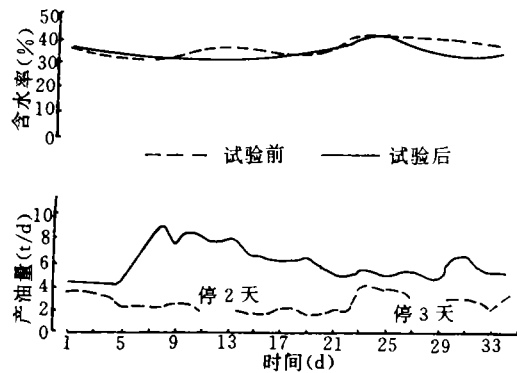


图 8 125' 井产量含水对比曲线

低频脉冲波处理前后原油分析结果表明,原油物性也发生了变化,见表 3。

五、结论

1. 低频脉冲波强化采油机理主要在于:它能在近井地带形成微裂缝网,扩大、疏通储层连通孔隙;改善孔隙中流体分布状态,降低原油粘度,促使残余油流动。

2. 低频脉冲波强化采油技术可用于油、水井除垢、降粘、解堵、增渗、增产增注。

表3 低频脉冲波处理前后原油物性对比表

项 目	125' 井			4305 井		
	试验前	试验后	降低百分数	试验前	试验后	降低百分数
胶质沥青(%)	31.32	30.56	2.4	30.47	29.63	2.7
含蜡量(%)	12.55	10.87	13.4	12.65	10.73	15.2
30℃粘度(mPa·s)	3 329	2 099	36.9	1 970	1 482	24.8
凝固点(℃)	14	4	71.4	8	2	75.0

3. 低频脉冲波处理油层增油降水效果显著,有效影响范围 200m,有效期半年左右。

4. 低频脉冲波强化采油技术投资少、见效快、工艺简单,能有效改善中、低渗透层开发效果,提高稀油、稠油油田的原油采收率。具有广阔的推广应用前景。

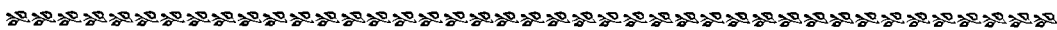
(本文修改稿收到日期:1994年5月21日)

[本文责任编辑 王霜梅]

参 考 文 献

[1] 史天德、田宗武、宋建平:稠油乳化常温开采法研究,《稠油热采技术论文集》,石油工业出版社,1993年5月

[2] 赵铁城译:油层的振波和振动处理,《油气田开发工程译丛》,1991年第6期



(上接第75页)

五、几点认识

1. 树脂小球堵水施工的5口井都有封堵效果,这说明树脂小球堵水在技术上是可行的。

2. 2口笼统挤注的井(北2-6-51、葡10-3-55),每个炮眼平均使用堵剂1.8kg,封堵效果明显。说明每个炮眼的堵剂用量为2kg的计算是合理的。

3. 树脂小球在现场施工中,现用现造,除第1口试验井造球温度过高,使小球熟化时间缩短外,其余4口井造球温度在30~35℃,均获得预期的树脂小球,说明配方合理,造球工艺是成功的。

4. 由于堵剂用量少(每个炮眼2kg),对油层的封堵不超过10cm,因此采用补射孔的方法,可以恢复封堵层的生产。

5. 树脂小球的配制及注入工艺简单、方便、施工安全可靠,采油厂可自行施工,便于推广。

6. 从树脂小球的封堵机理来看,它不仅适用于封堵油井的出水层,也可适用于报废井封堵和水井调剖。

7. 封堵层未能完全堵死的原因,分析认为可能是油层渗透率不均匀所致。采用不同熟化时间(即不同硬度)小球混合注入,熟化程度高的小球将高渗透层堵死后,挤注压力升高,较低熟化程度的小球在高压下可进入中低渗透层,从而达到一次将高、中、低渗透层同时封堵的目的。该技术的室内试验已完成,即将进行现场试验验证。

8. 油井的实际情况是复杂的,施工时应应对每口井做出正确的判断。对小球的用量、熟化时间、工艺措施做出正确的设计,施工时应严格按方案作业。

(本文收到日期:1994年4月23日)

[本文责任编辑 王霜梅]

balls stay in shot holes and are compacted and indurated by differential pressure, and then the high-permeability water-out zone is plugged. Because epoxy resin balls only stay in shot holes, a few of epoxy resin will be used for water control. The plugged zone may meet the needs of production in large pressure difference. This technology is easy to be popularized because of low cost, high strength and simple operation.

FIELD TESTS AND RESULT ANALYSES OF WATER CONTROL TECHNIQUE USING EPOXY RESIN SMALL BALLS

by Gao Zhenhuan, Chen Jinghui, Song Helong, Wang Dexi, Sun Yuzhu, Sun Shanjun

This paper introduces technology parameters, injection equipment and technology process of plugging water technique with epoxy resin small balls, provides a formula to estimate the water plugging agent consumption, analyses existing problems, and then proposes improvements. In field tests of 5 wells in Daqing oilfield, this technique obtains good results of water decrement of 215 cubic meters and oil increment of 3.5 tons per day. This shows that the said agent has reached the technical and economic indexes such as small plugging radius, high plugging strength, small agent volume, low cost, simple technology and safe operation and so on.

DISCUSSION ON THE METHOD FOR RECOVERING CASING GAS USING A CHECK VALVE

by Lian Huosheng, Leng Renchun, Gao Penglin

Casing gas can be recovered by installing a check valve between flow line and casing outlet of a oil well. After installation of a check valve in oil well, the average casing pressure may become larger than before. This paper analyses the effect of casing pressure variation on pump efficiency by an example with five submergence depths and three gas-oil ratios. Results show that it is reasonable and practical to use check valve to recover casing gas. The method for determining submergence depth and pump setting depth corresponding to maximum pump efficiency is carried out in this paper.

STUDY AND TEST OF ENHANCED OIL RECOVERY TECHNIQUE USING LOW – FREQUENCY PULSE WAVE

by Song Jianping, Chen Jianhua, Liu Bin

This paper discusses theoretically the technical performance, action mechanism, fracture effect on formation core, effect on improvement of pore structure and action on fluid of low-frequency pulse wave, makes indoor and field tests. The enhanced oil recovery mechanism of low-frequency pulse wave lies mainly in that it may produce fracture near wellbore zone, dredge formation, improve distribution state of fluid in rock pore, and lower oil viscosity etc. . Field test results show that this technique is useful for scale removal, viscosity reduction, plugging relief and stimulation of production and injection of oil and/or water wells, and that it has a vast application prospect because of small investment, quick returns and simple technology. It is chosen as excellent project of production stimulation of oil wells by dissemination centre of new technology of CNPC in 1994.