

处理强度, 提高处理效果; 二是降低声波振动频率, 减少声波波动能量在传播过程中的衰减, 提高处理深度。因此, 经多次室内及现场试验, 设计并制造了适应于助排工艺的声波发生器, 其主要性能参数为: 振动频率 200~1 000 Hz; 声压 > 3.14 × 10⁴ Pa; 声强 > 337 W/m²; 解堵深度 > 1.0 m。

2 解堵深度的理论计算

由流体运动及连续性方程得:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho a u^2 \\ \frac{\partial p}{\partial t} = \rho c \frac{\partial u}{\partial x} \end{cases} \quad (2)$$

式中, p 为静水压强; u 为位移速度; x 为振动波传播速度; t 为时间; ρ 为流体密度; a 为系数, $a = \lambda / 8\delta$; λ 为沿程水力摩擦阻系数, 对于孔隙介质:

$$\lambda = \frac{2mv}{v} \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (3)$$

δ 为孔隙通道的水力半径, 对于圆形孔道:

$$\delta = 0.5 r = \frac{A}{S} \quad (4)$$

式中, v 为流体运动粘度; m 为岩石孔隙度; v 为渗流速度; K 为岩石渗透率; A 为液流截面积; S 为湿周。

对于振动波可以近似的简化为谐波, 则

$$U = U_0 e^{i\omega t} \quad (5)$$

式中, U 为振动波的位移振幅; ω 为振动波的振动频率。

将式 (3)、(4)、(5) 代入式 (2), 应用傅里叶变换, 得:

$$\begin{cases} -\omega^2 U^2 + j n \omega U = c^2 \frac{d^2 U}{dx^2} \\ n = \frac{mv}{2r} \sqrt{\frac{m}{K}} \end{cases} \quad (6)$$

上式的边界条件为: $x=0$ 时, $U=U_0$, $\frac{dU}{dx}=0$,

U_0 为孔隙通道入口处声波振动的交变位移振幅。

利用拉普拉斯变换及其反演, 得到式 (6) 的解为:

$$U(x) = U_0 \sqrt{\sinh^2 \alpha x + \cos^2 \beta x} \exp(\tan \alpha x \tan \beta x) \quad (7)$$

由于 $\frac{U(x)}{U_0} = \frac{p(x)}{p_0}$, 则

$$p(x) = p_0 \sqrt{\sinh^2 \alpha x + \cos^2 \beta x} \exp(\tan \alpha x \tan \beta x) \quad (8)$$

式中, $\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2c}} \sqrt{1 + \left(\frac{n}{\omega}\right)^2}$, $\beta = \alpha + 1$ 。

根据式 (8), 取油田平均参数: 运动粘度为 654 000 $\mu\text{m}^2/\text{s}$, 平均孔隙喉道半径为 1.38 μm , 振

动波在液体中的传播速度 1 500 m/s; 则不同振动频率下 $p(x)/p_0$ 与 x 的关系如图 2 所示。

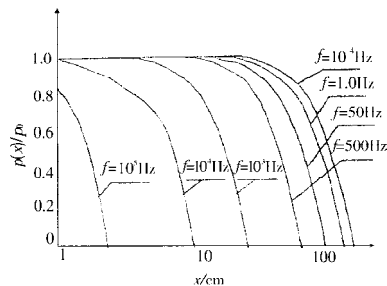


图2 不同振动频率下 $p(x)/p_0$ 与 x 的关系

从图 2 可以看出, 振动频率越高, 振动波向地层渗入的有效深度越小, 但相对能量比较集中, 所涉计范围内处理强度较大; 振动频率越低, 有效渗入深度越大, 但能量比较分散。该结论与室内试验结果相吻合。

3 工艺特点及作用机理

声波混气水解堵工艺技术具有声波解堵和混气水排液的共同优点, 不仅充分发挥和增强了声波的解堵效果, 又能较好地将进入井筒的固体堵塞物携带出井口, 是一项具有广阔应用前景的新技术。该技术的主要作用机理为:

1) 由于流体中混入了一定量的气体, 必定会提高声波发生器的激发效果, 而产生更大强度的声波振动。

2) 声波助排解堵的第二个主要作用就是空化作用^[2]。当声波解堵和混气水排液工艺相结合时, 混气水流经声波发生器由于掺进了一定的气体, 易于产生空化现象。由于气泡的非线性振动和它们破灭时产生的巨大压力对岩层有一定的破坏作用, 这样就有利于疏通油流通道, 提高地层渗透率。所以, 声波解堵助排技术的主要作用机理就在于使空化作用上升到更为重要的地位。

3) 当单纯的水作介质进行声波处理时, 由声波振动产生的热作用是微乎其微的。但当声波振动与混气水排液工艺相结合时, 空化现象以及由于空化而产生的激波作用更大, 由此而导致的局部热作用也会进一步提高。

4) 混气液体在变径流道中流动时会产生贾敏效应, 随着后续流体压力的增加, 超过气泡破裂表面张力的临界值时, 气泡就会发生爆炸。这种现象被称为气炮或气爆炸, 所产生的压力急剧变化对周围介质具有较大的破坏力, 它的解堵作用不可忽视。当声波解堵器与混气水排液工艺配合使用时, 流体在声波发生器部位流道突然变小, 因此在该部位就容易产生气炮

现象。

4 解堵工艺设计及控制

4.1 所需设备

- 1) 根据排量要求确定需要水泥车的数量, 一般情况下一台水泥车即可;
- 2) 井口自动携气装置;
- 3) 根据处理地层厚度确定所用声波解堵器的级数, 一般情况下在施工管柱上对准处理层底部接装一套声波解堵器, 较厚油层可以串接 2~3 套声波解堵器以提高处理效果。若在施工时能活动管柱也可只接一套而分段处理。

4.2 工艺流程

声波发生器与混气水排液工艺配合解堵的工艺流程见图 3。

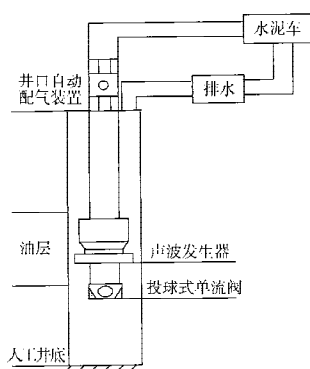


图 3 解堵工艺流程

4.3 选井条件

- 1) 以泥质胶结为主的砂岩油层的油水井;
- 2) 因泥粉砂、钻井液、机杂等无机物造成堵塞的油水井;
- 3) 因其它作业而污染油层需要返排的油水井。

5 现场应用效果及经济评价

在声波解堵综合配套技术与现场试验阶段(2001—2002 年), 现场试验应用 30 口井, 平均单井

日增液量 27.59 m³, 日增油 5.52 t, 动液面提高 321.8 m, 累计增加液量 110 770.6 m³, 累计增油 26 252.9 t。

自 2002 年底以来, 该技术在孤岛采油厂进行了较大规模的推广应用, 同时在辽河曙光采油厂、胜利滨南采油厂、桩西采油厂和大港南部油区进行了推广应用, 都取得了明显的效果。

1) 孤岛采油厂在 124 口井中进行了声波助排解堵施工, 平均单井日增液 24.20 m³, 日增油 5.30 t, 动液面提高 211.48 m, 累计增液量 6 888 202.6 m³, 累计增油 150 906.7 t。按每吨原油价格 1500 元计算, 共创造产值约 2.264 亿元。

2) 辽河曙光采油厂在 3 口井中进行声波助排解堵施工, 截至 2004 年 6 月 7 日, 3 口井累计增液 8 847.9 t, 累计增油 934.35 t, 且仍有效。

3) 2005 年, 桩西采油厂 6 口井、滨南采油厂 6 口井、大港南部油区 2 口井均进行了声波助排解堵施工, 除 1 口井增产效果不明显外, 其他的 13 口井增产效果都非常明显。若按平均单井增油 4 t/d, 有效期为半年计算, 则 13 口井累计增油 9 360 t, 创造产值约 140.4 万元。

6 结 论

1) 声波解堵与混气水排液工艺相结合可应用于近井底地带各种原因堵塞的油水井的解堵, 而且解堵效果良好。

2) 合理选择加气量还可以更好地提高解堵效果。

3) 解堵有效率达 98% 以上, 而且成本低、施工简便、经济效益显著, 具有很好的推广应用价值。

参 考 文 献

- [1] 路斌. 流体动力式发声器在采油工业中的应用研究 [J]. 物理, 2004, (4).
- [2] 黄继汤. 空化与空蚀原理及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.

[审稿 李相方]

Comprehensive Supporting Technology for Plug Removal with Sonic Wave

Zhu Jidong¹ Zhang Jianguo¹ Shi Aixia² Wang Feng¹ Chu Jie¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Shengli Oil Production Zone, Shengli Oilfield, Dongying, Shandong, 257000, China)

Abstract: In order to increase plug-removal success rate and oil output in Gudao Oilfield, the researches on comprehensive supporting technology of plug removal with sonic wave are done and an acoustic generator excited by hydraulic power is developed which can create high-amplitude and lower-frequency vibration waves. The acoustic generator combined with aerated-water-discharge technique can bring plugs out of hole effectively and remove plugs in the formation, dredge fluid channels, improve percolating environment and increase oil well productivity. The applications of about 160 times in Shengli, Liaohe and Dagang, etc. show it can increase liquid discharge by over 161% when compared with aerated-liquid-discharge technique, and remarkable benefits are achieved.

Key words: sound wave; plug removal; acoustic generator; enhanced oil recovery; Gudao Oilfield