

超声波采油技术的原理及应用*

王 阳 恩[†]

(江汉石油学院理学院 湖北 荆州 434023)

摘 要 文章介绍了超声波技术在油井增产、防蜡、防垢及除垢和对原油的降粘等方面的作用原理和作用效果,并说明了超声波采油的适用范围。

关键词 超声波技术,原理,采油,适用范围

THE PRINCIPLE AND APPLICATIONS OF ULTRASONIC WAVE
TECHNOLOGY IN OIL EXTRACTION

WANG Yang-En[†]

(School of Science, Institute of Jianghan Petroleum, Hubei 434023, China)

Abstract We review the principle and applications of ultrasonic wave technology is presented in increasing oil production, wax prevention, scale prevention and removal and oil viscosity reduction. The applicability range of ultrasonic wave technology in oil extraction is discussed.

Key words ultrasonic wave technology, principle, oil extraction, applied range

在石油开采中,提高中后期油井的产量及油田采收率,一直是采油工程中的重要课题之一^[1]。在油井开采过程中,常常会因各种原因在油井中形成一些堵塞物,阻碍原油流入井筒中,降低原油的渗透率。提高原油的渗透率,可采用各种物理、化学的方法。其中物理方法有声波技术、磁学技术、电磁场技术等^[2]。超声波采油技术则是近几十年发展起来的三次采油技术之一,通过声波处理生产油井、注水井及近井油层,使油层中流体的物性及流态发生变化,改善井底近井油层的流通条件及渗透性,解除采油井、注水井的堵塞及油井防垢、除垢、防蜡,提高采油量、原油产量和注水量,降低原油的粘度,提高原油、水在多孔岩石中的渗透率^[3-6]。

1 超声波油井增产

20世纪60年代,美国科学家首先进行了超声波油井增产的研究,并且在俄克拉荷马州华盛顿县的油井中进行了超声采油的矿场试验,试验取得了一定的成效^[7]。随后,原苏联在超声波采油技术的研究和应用方面进行了大量的工作,并一直处于世界

领先地位。我国在20世纪60年代也进行过超声波油井解堵技术的研究和试验,但因材料、技术不过关而被迫停顿下来。20世纪90年代,中国科学院成都传感器研究所研制出了可用于油田井下的大功率超声波采油机,并在玉门、大庆等油田现场进行了超声波采油技术的试验,使作用油田油层物性明显好转,流动系数、流度比、比层系数渗透率等均有大幅度提高,取得了比较理想的效果^[8]。利用超声波处理油井和油层,可以提高原油产量40%—50%,提高采收率10%以上,其成功率可达80%,增产期可长达半年以上。超声波采油的原理是:当大功率的超声波进入油层中时,油层中的毛细管直径就会随着超声波的作用发生时大时小的变化。当毛细管直径发生变化时,其表面张力、毛细管力也随之变化,如(1)式所示^[9]。由(1)式可知,当毛细管半径变大时,表面张力以半径的平方倍缩小,毛细管力以半径的立方倍缩小,这就使原来毛细管力和重力的平衡关系被打破,束缚在毛细管中的残余油,由于力的平衡关系被打

* 2002-03-06收到初稿,2002-05-21修回

† E-mail: wye19670926@163.net

破 就会在重力与超声波的振动作用下流入井中.此外,在大功率超声波的作用下,油层还会裂开,形成裂缝,提高原油的渗透率.室内实验结果表明:在适当参数的超声波作用下,可使原油通过砂岩时的流速增加 2—9 倍^[10].超声加速原油通过多孔介质时的最佳参数是:工作频率为 20kHz,声强为 170dB^[7].

$$\sigma = \frac{E_{\text{表面}} - E_{\text{相内}}}{\pi r^2}, \quad (1a)$$

$$P_{\text{毛细管}} = \frac{2\sigma \cos\theta}{r}, \quad (1b)$$

$$P_{\text{毛细管}} = \frac{\alpha(E_{\text{表面}} - E_{\text{相内}})\cos\theta}{\pi r^3}, \quad (1c)$$

式中 σ 是两相界面层的表面张力, $E_{\text{表面}}$ 是两相界面层所具有的能量, $E_{\text{相内}}$ 是相内同体积分子层所具有的能量, πr^2 是两相界面的面积, r 是毛细管半径, $P_{\text{毛细管}}$ 是毛细管力, θ 是水对岩石的润湿角.

超声波采油设备多为车载式,作业比较灵活方便.如图 1 所示,由安置在地面上的超声波发生器产生几十 kHz(一般在 16—30kHz 之间)的电信号,经电缆传输至位于井筒内油层段的超声波换能器,超声波换能器将电信号转换成声信号,声信号经井筒内的原油传播到油层中.目前,超声波发电器的电功率已达上百千瓦,超声换能器的形状一般是圆柱形,长度约 1—2m,半径约几十毫米左右^[11].

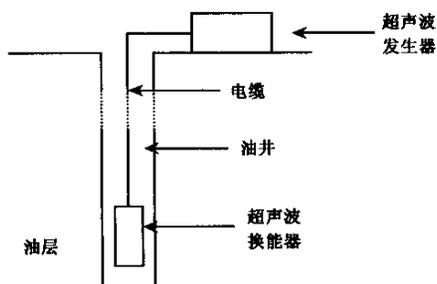


图 1 超声波采油示意图

2 超声波防蜡

原油中的固态物质主要是含碳原子数 16—64 的烷烃,这种物质就是石蜡.石蜡的熔点为 50—60℃,在地层温度条件下,石蜡熔解在原油中.在开采过程中,随着温度、压力的下降,石蜡从原油中析出,在深井泵、出油管壁、抽油杆上结蜡.轻者缩小细管半径,增加出油阻力,重则堵塞进油孔口,甚至出油管道,造成油井严重减产甚至堵死油井.因此,防止油井结蜡是采油中的一个重大课题.20 世纪 60

年代中期,原苏联开始进行超声波防止原油结蜡的试验研究.1967 年,前苏联老格罗兹内依油田进行了超声波防止原油结蜡的试验,其试验结果如表 1 所示^[7].试验原油的密度为 0.869g/cm³,含蜡量为 5.5%,原油粘度为 47.8 × 10⁻³ Pa·s,纯蜡密度为 0.816g/cm³,分子量为 420—450,蜡熔点为 56.8℃.结果表明,在超声场内,以比蜡熔点低得多的温度就可使纯蜡完全熔解在原油中,得到含蜡量高达 50% 的液体.而不加超声,只提高原油温度的试验表明:只有当原油的温度提高到 55—60℃ 时,纯蜡才能熔解到原油中去,而且使纯蜡熔解于含蜡 20% 的原油中所需的时间长达 50min.超声波化蜡的原理是:在强超声波的作用下,原油中会产生空化现象,即当超声波的强度足够大时,流体内会产生空穴和气泡,当其破裂时,会在局部产生高温、高压(压强可达十几个大气压,温度可达万度以上)^[12],超声空化可使石蜡在未凝结成固相前就被分散成极细的颗粒而悬浮在油液中,以致无法形成固相石蜡结晶,从而降低了熔化温度.

表 1 超声波熔蜡试验结果

试验顺序	混合物质	重量/N	超声作用时间/min	试验结果
1	原油	40 × 10 ⁻²	12	纯蜡熔解于原油中,使原油中含蜡超过 20%
	纯蜡	10 × 10 ⁻²		
2	原油	25 × 10 ⁻²	16	得到 50 × 10 ⁻² N 含蜡 50% 的液体原油
	纯蜡	25 × 10 ⁻²		
3	a 类原油 + 50% 蜡	25 × 10 ⁻²	20	得到含蜡的均质混合原油,试验起始温度 20℃,最终温度 34℃
	b 类原油 + 20% 蜡	25 × 10 ⁻²		
4	a 类原油 + 20% 蜡	40 × 10 ⁻²	14	纯蜡熔化在原油中,试验起始温度为 20℃,最终温度为 39℃
	纯蜡	20 × 10 ⁻²		

3 超声波防垢及除垢

在石油开采中,随着温度、压力的下降,溶解在地层水中的各种矿物盐类将沉积在井底设备泵内及管线内,这就是油田上常见的结垢现象.与油井结蜡一样,结垢同样会影响油井产量,严重的甚至堵塞管道,使井底泵卡死不能泵油.超声波防垢的主要机理是:当超声波作用于流体时,会产生下面三方面的作用而具有防垢功能(1)超声波传播速度随着介质的变化而产生速度差,从而在界面上形成剪切应力,导致分子与分子间、分子与管壁间结合力减弱,阻止垢

晶体附着在管壁上 (2) 超声波对流体介质的空化作用. 超声波在原油中产生空化现象时, 在高温、高压的作用下, 可加速 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的析出, 并且能够将已析出的碳酸盐及颗粒杂质击成细小颗粒悬浮于流体介质中, 从而起到防垢效果 (3) 超声波对流体产生的热效应作用. 当纵波传播到介质中时, 质点开始振动, 因而具有动能. 同时该处的质点将产生形变, 因而也具有势能. 在声波的传播过程中, 介质对声波的吸收使得质点温度有所提高, 超声波动能转换成热能的过程将产生电离效应从而破坏垢物的结垢条件, 起到防垢作用^[13]. 超声波防垢的效果很明显, 前苏联下瓦尔托夫油气联合局曾经进行了机械式超声波的防垢试验, 将检泵周期由平均 64 天检泵一次延长到 170—250 天检泵一次.

向结垢的井中置入超声换能器, 利用它产生的高强度超声波还可震掉和击碎较脆的盐垢物, 除去井底设备泵内及管线内的垢物, 从而大幅度提高油井的产量.

4 超声波对原油的降粘

超声波作用于原油上时, 会降低原油的粘度. 超声波对原油降粘的机理主要有两种: 一是超声波降解. 当超声波在原油中产生空化现象时, 原油中部分大分子的 C—C 键断裂, 原油中的组分发生变化, 从而降低原油的粘度. 如图 2 所示, 曲线 1 是采自江汉油田的原油未经超声处理时的粘度—温度关系曲线, 曲线 2 是该原油在强度为 1.8 倍超声空化阈值的超声波作用 3 分钟后的粘度—温度关系曲线^[6].

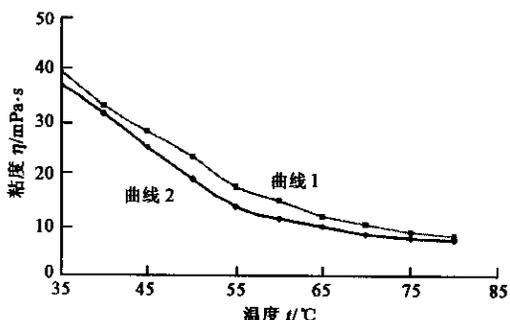


图 2 超声对原油的降粘效果

曲线 1 为未经超声处理, 曲线 2 为经超声处理

二是超声乳化. 当超声波的强度大于超声空化阈值且其作用时间比较小时, 超声波能将含水率比较高的原油形成水包油(O/W)型乳状液, 将油与油及油与壁之间的摩擦转变为水与水及水与壁之间的

摩擦, 从而大幅度降低原油的粘度. 乳状液的粘度 η 与外相粘度 η_0 及内相体积分数 ϕ 存在以下关系^[6]:

$$\eta = \eta_0(1 - \phi^{1/3}). \quad (2)$$

大多数情况下, 内相的体积分数 ϕ 不是很大, 因此乳状液的粘度 η 与外相的粘度 η_0 相差不大. 在外相是水的情况下, 乳状液的粘度很小, 与水的粘度相差不大. 在强度为 1.8 倍超声空化阈值的超声波作用 3min 的情况下, 含水率分别是 45% 和 50% 的原油的粘度如图 3 所示^[6].

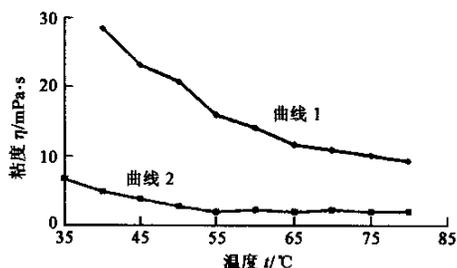


图 3 超声对掺水原油粘度的影响

曲线 1 为含水率为 45% 的原油, 曲线 2 为含水率为 50% 的原油

5 超声波技术与其他方法的结合

超声波采油技术在油田生产现场虽然取得了比较理想的效果, 但是超声波在油层中传播的距离很小, 不能作用到远处的油层, 只适用于近井地带. 将超声波与电场相结合, 可使其作用效果更好^[14]. 在多孔介质中存在双层电层, 无外加电场时, 流体流动产生流动电动势, 流动电动势对流体渗流起阻滞作用. 在介质中外加电场后, 外加电场的一部分用来抵消流动电动势, 剩余部分引起正向渗流. 设外加电场大小为 E , 流体驱替压力梯度为 dP/dx , 毛细管中介电常数为 ϵ 的流体体积流率 Q 可表示为

$$Q = C_1 \epsilon E - C_2 \frac{dP}{dx}, \quad (3)$$

式中 C_1, C_2 为与毛细管结构有关的常数. 随着电场强度 E 的提高, 流体渗流速率增大. 在施加声场和交流电场的情况下, 声场引起的孔隙流体涨缩运动使得电荷密度发生变化. 这些变化一方面影响了电导率的变化, 使传导电流发生改变, 另一方面电荷的密度变化伴随着位移电流, 这二者都能增强交流电场的作用, 因而声电复合场可比单一声场或电场更好地提高采收率. 此外, 超声方法还可与化学方法相结合, 增强超声的作用效果^[15]. 在超声空化的作用下, 水分子 H_2O 可产生 H^+ 自由基, 而在原油裂解

过程中,适当的催化剂可加速原油的氢化裂解,将超声与催化剂相结合,能加大超声对原油的裂解作用,降低原油的粘度.

6 超声波采油的适用范围及优点

通过对超声波采油机理的深入研究及现场应用,超声波采油的适用范围主要有(1)钻井时,泥浆浸泡时间较长,对油井造成严重污染的油井(2)油层堵塞严重,且对水、酸敏感的油井(3)距油水边界较近,不能采用压裂增产措施的油井(4)油层物性好,油层厚度大,但出油能力差的油井(5)稠油井、结蜡井(6)因盐垢、垢堵或者由于机械杂质污染而渗透率急剧下降的油井.

超声波采油的主要优点有(1)作用迅速,增产效果明显(2)不会对油井产生污染,不会损坏油层;(3)设备费用相对较低,施工工艺简单,成本低,效益高(4)可与其他增产方法结合使用,优势互补(5)适用范围广.

目前,超声波采油技术无论是在工艺技术,还是在设备的研究方面都已经趋向成熟.该技术具有广阔的发展前景,必将对油田的后期增产起到重要的作用.

参 考 文 献

[1] 沈平平,袁士义,韩冬等.石油学报,2001,22(11):45[Shen P P, Yuan S Y, Han D *et al.* ACTA Petroleum Sinica, 2001, 22(1): 45 in Chinese]]

[2] 路斌,关继腾.物理,2002,31(4):235[Lu B, Guan J T. Wuli (Physics) 2002, 31(4): 235 in Chinese]]

[3] Hale J M. Applied Ultrasonic, 1989, 24(3): 350

[4] Wright T R. World Oil, 1980, 191(6): 79

[5] Amer. Oil Gas Reporter, 1976, 18(11): 56

[6] 王阳恩,邓胜华,杨长铭等.科技通报,2001,20(3):57[Wang Y E, Deng S H, Yang C M *et al.* Bulletin of Science and Technology, 2001, 20(3): 57 in Chinese]]

[7] 黄序韬.应用声学,1984,4(4):7[Huang X T. Applied Acoustics, 1984, 4(4): 7 in Chinese]]

[8] 黄序韬.石油学报,1993,14(4):110[Huang X T. ACTA Petroleum Sinica, 1993, 14(4): 110 in Chinese]]

[9] 李明远,董朝霞,纪淑玲等.石油学报,1999,20(6):57[Li M Y, Dong C X, Ji S L *et al.* ACTA Petroleum Sinica, 1999, 20(6): 57 in Chinese]]

[10] Aarts A C T, Ooms G, Bil K J *et al.* SPE, 50594-239

[11] 刘孟利,何明伟.石油钻采工艺,1997,19(增刊):55[Liu M L, He M W. Oil Drilling & Production Technology, 1997, 19(supplement) 55 in Chinese]]

[12] Wu C C, Roberts P H. Phys. Rev. Lett., 1993, 70(22): 3424

[13] 张锡波,张群正,林文兴等.西安石油学院学报(自然科学版),2000,15(3):14[Zhang X B, Zhang Q Z, Lin W X *et al.* Journal of Xi'an Petroleum Institute, 2000, 15(3): 14 in Chinese]]

[14] 邵长金.石油钻采工艺,1999,21(4):73[Shao C J. Oil Drilling & Production Technology, 1999, 21(4): 73 in Chinese]]

[15] 李春喜,宋红艳,王子镐.石油学报(石油加工),2001,17(3):86[Li C X, Song H Y, Wang Z H. ACTA Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2001, 17(3): 86 in Chinese]]

2002 年第 12 期《物理》内容预告

评 述

固体间界面的物理模型和界面对声波的反射(王耀俊).

知识和进展

固态量子计算(金光生等);
超高密度磁光存储及其介质研究进展(王现英等);
新一代高密度数字多用光盘(HD-DVD)(刘波等);
闪电物理(庄洪春).

物理学和高新技术

激光等离子体推进在火箭推进技术领域的应用前景(鲁欣等).

实验技术

自旋极化扫描隧道显微术(潘明虎等);
自旋极化电子显微术及蒙特卡罗模拟(孙霞等).

物理学史和物理学家

哈雷与《自然哲学的数学原理》(张岚);
弗兰克和赫兹对原子能级存在的实验研究(刘战存等).