

## 参 考 文 献

- [1] 李芳, 物理, **23**(1994), 518.  
[2] Y.F. Lu et al., *Appl. Phys.*, **A59**(1994), 281.  
[3] A.C. Tam et al., *J. Appl. Phys.*, **71**(1992), 3515.  
[4] J.D. Kelley et al., *SPIE Proc.*, **1415**(1991), 211.  
[5] K. Imen, S. J. Lee and S. D. Allen, *Appl. Phys. Lett.*, **58**(1991), 203.  
[6] B.S. Park et al., *Opt. Lett.*, **15**(1990), 206.  
[7] 晓晨, 国外激光, No. 12(1994), 41.  
[8] 友清, 国外激光, No. 5(1993), 29.  
[9] 朱德恒、严璋主编, 高电压绝缘, 清华大学出版社, (1992), 311.  
[10] 友清, 激光与光电子学进展, No. 5(1995), 39.

# 超声波在油田开发中的应用及作用机理\*

郑茂俊 严焯培 储俊

(石油大学数理系, 山东东营 257062)

**摘 要** 综合介绍了近年来超声波在石油开采中的应用, 较详细地讨论了超声波的可能的作用机理。

**关 键 词** 超声波, 增产, 机理

## 1 引言

一般把频率高于 20kHz 的弹性机械波称为超声波, 由于超声波具有强烈的空化作用、机械振动作用和热效应的特点, 使它在油田开发中得到广泛的应用<sup>[1,2]</sup>, 世界上以前苏联和美国发展较快。据国外资料报道, 经过超声波处理的油井产量可提高 40—50%, 采收率提高 10—15%, 成功率达 80% 以上。超声技术在我国油田开发中的应用起步较晚, 应用范围还不小。我国玉门油田自 1989 年以来共施工 170 多口井, 有效率达 87%, 累计增油近万吨。大庆油田 1994 年从俄罗斯引进两台小直径声波作用仪, 投入现场应用之后, 也取得了一定的效果。实验表明, 超声波还能起破乳、降粘、清蜡、防垢的作用。本文将综合介绍近年来超声技术在石油开采中的一些主要应用, 较全面地分析、讨论其作用机理。这有助于超声技术在我国油田开发中的应用研究及推广。

## 2 利用超声技术增加原油产量及其机理

随着石油及天然气的不断开采, 地层压力会下降, 此外, 在油田开发过程中, 由于油层伤害、堵塞, 加上原油和地下水在地层和设备中结垢和结蜡等原因, 油气通道被堵, 使油层渗透率降低, 产量下降, 使相当一部分油井成为低产井或停产井。美国曾在西德克萨 9 个分开的产油区, 在 240km<sup>2</sup> 的范围内进行了 21 口井的超声波处理试验, 这些油井的总增油量为 1.11 × 10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>, 投资与效益之比为 1:7.75。前苏联在曼格什拉克、西西伯利亚、格鲁吉亚等油田采用频率为 12—80kHz, 声强为 1—2W/cm<sup>2</sup> 的声场对 18 口油井进行了处理, 处理后日净增产 201.75t, 平均增油率为 73%, 其中 6 口井有效

\* 1996 年 1 月 29 日收到初稿, 1996 年 3 月 19 日收到修改稿。

期在一年以上,4口井在半年以上。

产生上述效果的机理是比较复杂的。超声波的机械振动作用、空化作用和热效应都有可能改善井底和地层的流通条件及渗透性。超声波在媒质中传播时,油、水、岩石等不同声阻抗物质,其振动加速度和振幅各不相同,两种物态界面的物质将发生相对运动,使堵塞颗粒剥落而达到解堵的目的。振动作用会使岩层毛细管孔径发生胀缩,降低孔隙内的表面张力,吸附在孔隙表面上的表面膜有可能被破坏,有利于原油进入孔隙而汇集。在已经衰竭的油藏中,剩余油通常以油滴形式分散在水中,密度差造成油水分离,弱超声波场的激励作用,有可能使离散的油滴凝聚,在孔隙里形成油流,从而增大油的可动性。声场在液体中传播时,由于媒质吸收波的能量,液体会产生多种不同的非线性效应(如紊流、声波流、空化作用等),能不断冲刷油孔道,疏通孔隙,增大孔隙的有效尺寸,提高岩层的渗透率。

超声波在液体中传播时,液体中的微小泡核被激活,表现为泡核的振荡、生长、收缩及崩溃等一系列动力学过程。空化泡崩溃时,在其周围的极小空间和极短时间内,产生的局部高温达 $10^4\text{℃}$ ,瞬时压力可达几千甚至几万个大气压,并伴生强烈的冲击波和时速达400km左右的射流,即空化现象。空化作用可能导致岩层产生微裂缝,可冲刷出孔隙中的堵塞物,因而提高了岩层的渗透性。但空化现象能否发生,与声波强度、频率、外界压力、液体的粘度等因素有关。井底和油层中的情况是复杂的,至于是否产生空化现象,还视具体情况而定。

超声波的空化作用和振动作用可使原油中的胶质、沥青质等高分子聚合物降解,分子链断裂,降低原油的粘度,有利于原油的流动,可提高渗流速度。实验表明<sup>[3]</sup>,在超声波作用下,原油粘度可下降25—30%。

对岩样的多次试验表明<sup>[4]</sup>,超声波可使油对多孔岩样的渗透率增加一倍以上。多孔岩样被泥浆、泥浆处理剂、橡胶颗粒等杂质堵塞后,经超声波作用,能使岩样的渗透率恢复到原来

的61—88%。

超声波在媒质中传播时,媒质吸收的声能转化为热能;在不同介质的分界面处,边界摩擦产生热;空化作用在汽泡崩溃时释放出大量的热能。这些作用都可使原油温度升高,降低原油粘度,提高原油的流动性,有利于原油开采。实验表明<sup>[5]</sup>,超声波的热效应对提高多孔岩样的渗透率有明显的作

### 3 超声乳化降粘和破乳脱水

#### 3.1 超声乳化降粘

有些油井属高粘井,原油粘度高,流动性差不易开采。为了降低粘度,增加流动性,现在一般采用注水蒸汽、火烧油层等开采办法。但热采技术复杂,受原油粘度、油层厚度、埋藏深度等条件制约,影响了稠油的开采效果。加拿大阿尔伯达省研究超声降粘集输工艺的结果表明<sup>[6]</sup>,在沥青与碱液混合体系经超声波作用后,在沥青/碱液组分比 $\leq 2:1$ 时,混合体系的粘度不超过10mPaS。稠油粘度明显下降。河南油田也使用井楼的特稠油做了类似的实验<sup>[7]</sup>,效果完全相同。分析原因可能是超声乳化作用使稠油形成水包油型乳化液。经验表明,其粘度可用下面的经验公式表示<sup>[8]</sup>:

$$\eta = \eta_0 e^{k\varphi}$$

式中 $\eta$ 为水包油乳状液的粘度, $\eta_0$ 为水的粘度, $\varphi$ 为油在乳状液中所占的体积分数, $k$ 为常数。 $k$ 决定于 $\varphi$ :当 $\varphi$ 低于或等于0.74时, $k$ 为7.0;当 $\varphi$ 超过0.74时, $k$ 为8.0。此时,液体的粘度只与水的粘度及油在乳状液中所占的体积分数有关,与油的粘度无关。因而混合液粘度大大降低。超声波是致使稠油活性水(碱水)充分混合乳化的高效手段,是一种有应用前途的稠油非热力开采技术。据英国《金融时报》报道,英、日、美等国目前正普遍推广应用地面稠油乳化技术。

#### 3.2 超声破乳脱水

绝大部分的原油都是在油水乳状液的状态下采出的,因此,原油破乳脱水成为采油工艺的

重要课题之一.实验表明,用适当频率和适当声强的超声波对原油处理,可破乳脱水.美国曾在一个 80m<sup>3</sup> 的原油贮罐中安装了一台 1.9kW 的超声波发生器,工作频率为 22kHz,这台设备可从乳化油中脱去 99.7% 以上的水.

## 4 超声波防垢和防蜡

### 4.1 防垢和除垢

在石油开采中,随着温度和压力的下降,溶解在水中的各种矿物盐类将会以晶体的形式析出,使管道、装置及泵壳内结垢而堵塞.试验表明,在管道内安装连续工作的超声波发生装置后,管道运行畅通.

超声波能穿透到垢层微粒内,使盐垢质点获得巨大的加速度.由于金属和垢层的弹性模量、声阻、振动速度及加速度不同,从而使界面上产生剪切错位,使垢层变为微粒状而从金属上脱落,达到除垢的目的.

### 4.2 防蜡和除蜡

在油层条件下,蜡是溶解在原油中的.当原油从油层流入井底,再从井底上升到井口的过程中,由于压力、温度的降低,引起油井和输油管线上结蜡,使管径缩小,日排量降低.为维持产量,常需进行热蒸脱蜡或停止清蜡.采用超声技术,可减缓或防止结蜡.

超声空化作用和振动作用可能使长链石蜡

烃分子断裂,使蜡的熔点降低.空化作用还可能使蜡晶破碎成极小颗粒,同时超声波的剧烈搅拌作用,提高了蜡晶的溶解速度,有利于流动的原油把蜡晶带走.由于振动速度的差异,原油与结蜡层、管壁之间产生摩擦,产生局部高温,使结蜡层软化、溶解、直至脱离.

## 5 结束语

超声采油技术作为近年来采油新技术中的一个重要部分,由于其技术上、经济上的优点,正在不断发展.声波作用于油井、油层不会产生污染作用,不会损坏油层,适用于开发非均质油藏、粘土油藏及特粘稠油藏及中晚期油田及低产井,在油田开发中具有广阔的应用前景.今后还需进一步加强机理研究和效果分析,以提高处理效果,扩大超声技术的应用范围.

### 参 考 文 献

- [1] 宋建平,石油钻采工艺, No. 5(1993), 82.
- [2] 郭丽芳,石油钻采工艺, No. 3(1995), 99.
- [3] 刘兵,世界石油工业, No. 1(1995), 28.
- [4] 严焱培、吴小微等,石油大学学报, No. 6(1989), 72.
- [5] 邵长金、沈本善、严焱培,石油大学学报, No. 2(1993), 17.
- [6] 宋建平,国外油田工程, No. 5(1994), 23.
- [7] 宋建平、田宗武等,大庆石油地质与开发, No. 2(1995), 42.
- [8] 赵福麟,采油化学,石油大学出版社, (1989), 145.

## 1996 年第 10 期《物理》内容预告

### 知识和进展

凝聚态物理学与材料研究的前沿问题(冯 端);  
高级脑活动的功能性核磁共振成像(崔 霁等);  
纳米复合稀土永磁材料——稀土永磁领域的新方向  
(孙校开等);  
信息论在粉末衍射分析中的应用——最大熵方法  
(饶光辉);  
磁性物质家族新成员——铈原子簇(杨金龙等);  
永磁材料的微粒取向和织构函数(高汝伟);  
氢原子相干态研究的进展与启示(刘全慧等).

### 物理学和经济建设

三维面形测量技术的新进展(苏显渝等);  
数字全息光刻技术(余建国);  
隐身技术在飞机上的应用(顾月清等).

### 实验技术

掠入射 X 射线衍射和散射实验技术及应用(姜晓明);  
冲击压缩——极端条件下研究物质结构的有效方法  
(彭商强);  
光折变晶体在全息干涉实验中的应用(胡秀琴);  
紫外光解臭氧及其应用(南引明).