

# 值得注意的采油声学

黄序韬 梁淑寰

(华北油田采油工艺研究所)

随着现代科学技术的发展,使越来越多的新技术进入了石油生产。与目前采油中常用的手段相比,声波有许多独特的优点,它更容易辐射到井眼周围的油层中去,以及在密闭的管道中流动的油水中去,影响流体的性质和流态。所以,以增加单井产量为目的

的声波采油应用研究也就应运而生了。近年来,逐渐形成了功率声学中的一门分支学科——采油声学。

采油声学的主要研究内容有:油井超声波防蜡,防垢,除垢。声波油井增产,水井增注等等(表一)<sup>[1]</sup>。用于采油的各类声学设

表一 油田开采用的声学处理方法及设备

施工种类	施工目的	使用设备	作用机理
1. 诱喷	油井大修后诱喷开发时提高地层吸收系数	深井换能器	在声场中提高多孔介质的渗透率
2. 解堵	清除井底泥浆污染堵塞,提高流量	深井换能器	同上
3. 提高地层吸水能力	提高注水井的注水能力	深井换能器	同上
4. 调整注水井的吸收剖面	调节中、低渗透层和高渗透层的渗透性	深井换能器	同上
5. 油井热采时用声的方法提高热处理效率	在下列处理时,提高被加热地层的深度。 a. 注蒸汽加热时 b. 电加热处理时 c. 电磁场加热时 d. 层内燃烧时	深井换能器基础上的热声装置。 电声换能器—哨	热声学:在声场中成倍地提高地层的导热系数。
6. 提高生产层中注入的表面活性物质的效率	提高表面活性物质向介质的透入率。 调整表面活性物质的注入剖面	水动力型的深井换能器	在声场中提高多孔介质的渗透性。储油层颗粒的机械活性化
7. 防止气体水化物在井底和设备上沉积	破坏井底的水化物堵塞	热声辐射器	加速气体水化物的挥发
8. 防垢	声防止盐垢沉积在井底设备上,提高电潜泵的工作效率	水动力型换能器	破坏表面结晶体,降低表面结晶速度。
9. 声强化气举采油	提高液柱的举升力	水动力型换能器	声作用加速气体排出
10. 油水乳液举升中的破乳作用	声击碎乳液颗粒	水动力型换能器	声在液体中的空化作用破W/O乳液。
11. 声处理注入水,防止硫酸盐产生细菌	在水未注入地层前消灭水中的细菌	水动力型换能器	声在液体中的空化作用消灭细菌
12. 注水前沿推进之后处理井底及地层	破坏W/O型乳状液	电声深井换能器	声的破乳(W/O)作用
13. 声处理管线中输送的粘滞原油	长时间地改变原油流变性的声作用	热声辐射器	在声的空化作用下,加热并且不可逆地降低原油的粘滞性。

表二 采油用超声设备分类

设备种类	工作原理	应用范围	技术性能	操作特点
流体动力型换能器	变液流能或气流能为弹性振动能	1.防止设备结垢 2.加剧岩石的破碎作用	工作频率 100-1000Hz 声强: 50千瓦/米 <sup>2</sup> 临界声压: 10-20大气压	在液流中工作
机械推进的振动器	变液流能或气流能为弹性振动能	强化采油	频率范围 100-500Hz 脉冲声压: 150大气压	伴随有水力冲击
磁致伸缩换能器	变电能为具有磁致伸缩效应的声能	1.诱喷, 强化采油。 2.井底辐射 3.防止设备结垢	频率范围 1-100KHz 临界声强 50千瓦/米 <sup>2</sup>	发生器在地面, 辐射器为圆柱形、重量 350 公粗。 (不包括电缆)
压电陶瓷换能器	逆压电效应将电能变为声能	1.诱喷, 强化采油。 2.井底声辐射 3.防止设备结垢。	频率范围 1-100KHz 声强: 50千瓦/米 <sup>2</sup>	发生器在井下, 辐射器是杆式的, 重量 50 公斤。 (不包括电缆)

备也已研制出来(表二)。有的设备已经形成系列。国外对采油声学的研究高度重视, 苏联, 美国都把声波采油应用技术列为八十年代的采油新技术及发展对象。声技术采油应用研究涉及内容较多, 有些内容国内也开始了这方面的研究工作, 本文摘其要者介绍如下。

## 一、超声波防蜡、降粘

石油中的固态物质主要是含碳原子16~64的烷烃(即  $C_{16}H_{34} \sim C_{64}H_{130}$ ), 这种物质叫石蜡。石蜡的熔点为50~60°C, 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, 压力下降, 石蜡从原油中析出, 在深井泵中, 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, 防止油井结蜡成为采油中的一个重大课题。常规方法是油管涂料或化学防蜡, 为了探索新的方法, 1967年, 苏联老格罗兹内依油田进行了超声波防蜡的室内试验<sup>[2]</sup>。试验结果: 在超声场内, 石蜡在34°C温度(远低于蜡熔点)条件下就可以完全熔解在原油中, 而同一原油油样, 不加超声辐射, 发现只有把原油的温度提高到55—

60°C时, 石蜡才能熔解到原油中去。试验结果引起采油技术人员的极大兴趣。分析认为: 超声化蜡的主要机理是超声的分散作用, 即超声在原油中产生的空化将石蜡分散为极细的颗粒悬浮在油液中。为了防止油管和出油管线中结蜡, 国内外都曾采用过在油管或地面管线中安装超声波发生器的方法<sup>[3]</sup>, 它是利用油流的能量产生超声波。在超声波的高频振荡作用下, 防止蜡的聚集结晶, 都产生过一定效果。苏联那特沃尔石油管理局在两口油井的井口上进行了超声波清蜡的现场试验, 均取得了满意的效果<sup>[4]</sup>。超声波防蜡的研究试验是有意义的, 有些情况下例如: 关井测压, 停抽, 在这种情况下, 采用常规方法防蜡的油井往往发现结蜡, 严重的甚至造成无法开井生产, 这时用超声辐射来防止油井结蜡是比较适合的。国内近来也开始了超声防蜡降粘的试验, 都取得了明显的效果。图1给出了任丘原油加超声处理与不加超声处理的粘度—温度曲线对比。试验过程如下: 取50克的冻油样两份, 1份用JC-3型超声处理机的变幅杆插入冻凝油内, 加150W的声功率处理1—3分钟, 超声迅速熔化冻凝原油并升温至80°C, 然后自然冷却降温, 用NCG-2型超声粘度计测量各温度下对应的粘度, 将各点连成曲线。另1份冻油样用热水

溶化并将油液升温至80°C，也用同样的方法测出它的粘温曲线。实验结果：经超声处理过的原油明显地降低了对应温度下的粘度。这一试验结果为采油中不可逆地降低原油粘度的现场冷输试验准备了试验基础。

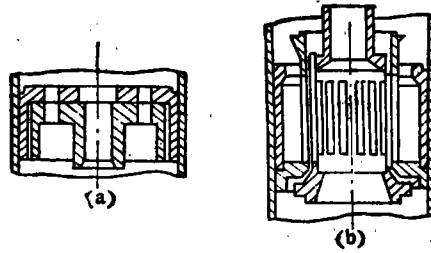


图2

a. 轴线型声波发生器。b. 辐射型声波发生器。

动力式机械声波发生器以后，油井的平均免修周期大大延长。苏联达格斯坦的苏阿姆斯库地区从77年开始超声波防垢的现场试验<sup>[6]</sup>。该地区地面管线的盐垢沉积速度达到1毫米/昼液，这使得4英寸的地面管线2—3个月就完全堵死，在管道内安装了连续工作的磁致伸缩式超声波发生器以后，管道运行通畅。这种装置电路简单，每个装置平均耗电25—30瓦，最小作用距离15米。试验表明：

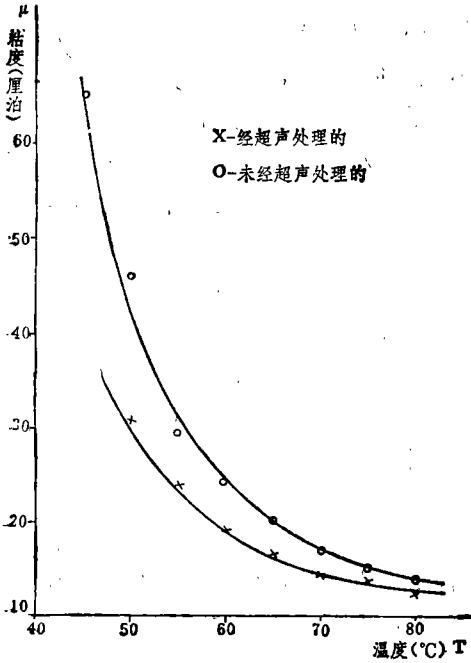


图1

## 二、超声波防止油井结垢、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系内及管线内，这就是油田上常见的“结垢”现象。我国江汉，长庆等油田结垢现象比较常见。跟油井结蜡一样，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。常规办法是化学防垢，除垢。采油中超声防垢的研究取得了很大进展，并在油田上大面积试验成功。全苏地质化学研究所和西伯利亚油田研究所联合研制了十多种型号的防垢用机械声波发生器<sup>[5]</sup>，并形成系列ΓАП。图2为其中的a型，b型。试验结果表明：井底泵装上了这种流体

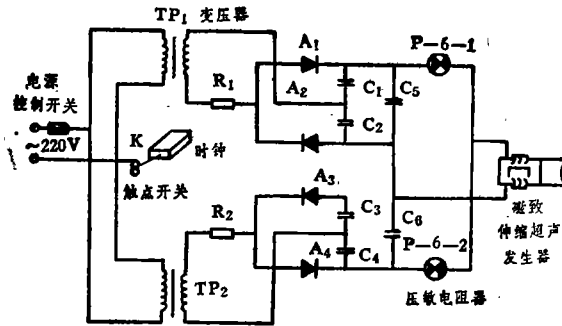


图3 超声发生器的电原理图

装置工作可靠，耗电低，使用一套装置每年平均可节省38,000卢布，图3给出了这种超声装置的电原理图。据报道目前西西伯利亚石油科学研究所和全苏石油科学研究所正在成批制造用于矿场防垢的Y3ΓH-2-6和Y3ΓH-6M电超声防垢装置。超声防垢的机理是由于声波向管中辐射时，声相速度差而引起盐垢微粒与金属表面之间发生剪切，无机盐微粒无法在金属表面沉积。

向结垢的井中置入强大的电压脉冲波声源——声激仪<sup>[7]</sup>，利用它产生的高强度声激

波震掉和击碎较脆的盐垢物，可以大幅度提高油井产量。在美国西德克萨斯州9个分开的产油区，半径240平方公里范围内，进行了21口井的声波除垢处理，处理的油层有砂岩和碳酸盐岩，全部油井经声波处理后从这些井增加的总产油量是70,000桶，价值350,000美元，而总的处理费用仅40,000美元，纯经济效益达7.75%，目前，这项技术掌握在美国的DSI公司手中，但它不出售设备，只提供技术服务。

### 三、声波诱喷、采油

苏联1977年开始了声波诱喷的现场试验，据报道<sup>[8]</sup>：卡拉森巴斯的218探井，油层压力低，不能自喷，无工业性油流。向井中置入了长1.5米的磁致伸缩发射器，地面超声电源发生器供给10千瓦的电功率，在井底造成了1—1.5瓦/厘米<sup>2</sup>的声辐射，超声辐射1个半小时后，油井开始自喷了，连续4天产量稳定，平均日产油0.3—0.5方。美国休斯敦的SPOR有限公司研制出一个井下声波

辐射装置，在两口低产井中作声辐射增产试验，均取得了成功<sup>[9]</sup>。图4给出了美国的一个井底低频声波辐射装置。条块形压电元件由楔形滑块压紧在油套管之间的环空中，电源电缆从油管置入，换能器工作时发出10千赫的声波通过射孔进入油层。分析认为：当大功率的声波进入油层时，油层中的毛细管直径就会随着声波的作用发生时大时小的变化，当毛细管半径变大时，表面张力减小，这就破坏了毛细管力与重力之间的平衡，于是，滞留在毛细管中的原油在重力作用下流入井中，再由深井泵泵到地面管线中去。我国声波采油的试验研究工作已开始几年，也取得了若干进展，如最近研制了一种声波无杆采油泵，井下井试验成功。

### 四、原油超声乳化堵水

油井出水将导致减产，自喷井停止自喷。堵水就是用机械的，化学的方法堵住油井的出水层位，目前主要采用化学堵剂堵水。石油乳状液堵剂，早就受人重视，因为这种原油乳状液堵剂的主要原料是原油和水，与化学堵剂比较，来源广泛，成本低得多。苏联《油矿业》杂志1981年第九期报导<sup>[11]</sup>：全苏石油科学研究院于1974—1977年在罗马什金油田用油包水乳状液进行了26口井的堵水试验，成功率达72.3%，其中通过专用孔处理的井成功率达100%，表3给出了26口井的处理效果。施工现场配制乳状液，由于需要的乳状液用量大，因此需要专门的设备，在配液站上安装了两套УГС-7У型超声簧片式液哨声源，由于喷嘴经常发生堵塞，后来改用ГИЭ1型转子型流体动力哨。配制简单，价格便易是憎水的W/O乳状液堵水的突出优点。这种堵剂的堵水机理是：在水层，当油包水乳状液与水接触时，即产生阻挡水流的贾敏效应。但在油层，当乳状液与原油接触后，增大了油外相的体积百分数，破坏了乳液的相体积

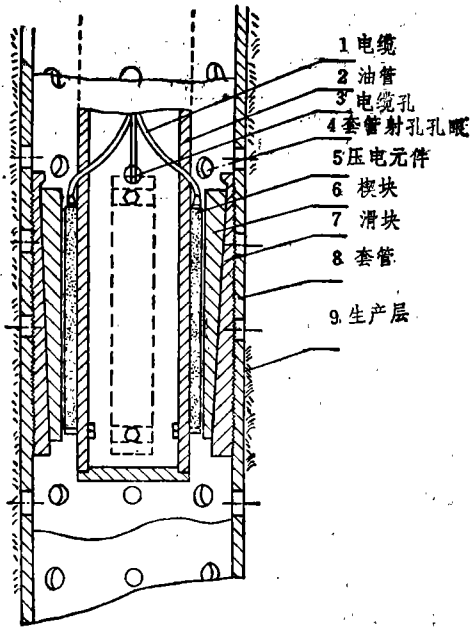


图4 井底低频声波辐射装置

表3、罗马什金油田乳液堵水效果

序号	井号	作业前 油井含水率 (%)	有效 时间 (月)	减少出水量 (千吨)	增加采油量 (千吨)
1	8483	99	14	26.7	0.43
2	2925	95	0	—	—
3	1861	100	0	—	—
4	8386	92	0	—	—
5	2844	96	60	187	3.5
6	2948	98	0	—	—
7	1909	98	2	12	0.25
8	9234	90	0	—	—
9	6104	81	0	—	—
10	7127	90	55	56.1	6.5
11	2808	95	26	50	1
12	8538	58	0	—	—

## 经过专门孔眼处理的井

13	9669	71	44	25.6	7.9
14	8449	95	31	52.8	0.6
15	2843	98	50	200	4.3
16	8509	98	13	17.5	3.3
17	7076	70	13	2	2.5
18	3518	86	38	89	12.9
19	8487	98	49	427	5.8
20	8227	82	7	8.2	1.5
21	2834	92	33	6	1.4
22	8294	92	8	45.2	1.26
23	4317	86	49	35.5	4.8
24	8526	80	27	68.6	13.7
25	8454	87	20	8.4	1.1
26	8353	77	5	31.5	0.7

平衡而自行破乳。因此，不会在毛细孔道中形成阻挡油流的贾敏效应。这种乳状液堵剂具备堵水不堵油的特点。室内试验研究的结

果表明：为了使乳液颗粒能进入地层孔隙孔道，被注入的乳液颗粒直径必须等于或小于地层孔道直径的1/3，对罗马什金的地层孔隙特性而言，乳状液的颗粒直径应为1—15微米，其中70%以上的乳滴应为1—3微米，这种乳状液的水油比为6:4，内相为浓度2.5%的硫酸水溶液，加硫酸水溶液的作用是为了得到高度稳定的油包水型乳状液。现场用МИН-8型显微镜对机械超声制备出来的乳状液颗粒进行观察，结果完全符合要求。国内也开始了超声制备原油乳状液堵剂的研究工作，曾用X-1系列悬臂式簧片哨对同样配方的油水混合液处理1分钟，得到十分稳定的原油包水乳状液，采用XPA-1型偏光显微镜观察测定乳液颗粒直径为1.6~2.4微米，将乳液样放置在80°C的恒温箱内作两个半月的热稳定性考察，未观察到油水分层现象。

## 五、看法与建议

采油声学的研究内容较多，本文不能一一赘述。由于历史的原因，我国采油声学方面的研究试验工作中断了一段时间，现在有的油田已相继开始了这方面的试验，并见到了成效。但与国外的水平相比，还存在着不小的差距。首先是各种井下声学设备的研制，尤其是井下电超声设备的研制必须解决，否则，与国外先进的采油声学设备相比，就还是处在‘小米加步枪’或‘大刀长矛’的装备阶段。与传统的采油方法相比，声波采油有许多独到之处，是其他采油方法所不及的，但技术上也存在着相当的难度，它是一门声学理论与采油理论高度综合的边缘科学。各声学研究中心与油田的采油工艺研究所应协作攻关，并得到有关部门的组织。从报道看，苏联有许多突破就是这样搞出来的。现在发现，国外独家发展起来的采油专用声学设备拒绝谈判出售，只同意提供高价现场服务。

(下转第34页)

114 号器件声速测量值  
(晶体沿通声方向长11.44mm)

	测量频率(MHz)	$\Delta f$ (MHz)	声速 $V_m$ (m/s)
第一 次量	100.081	0.027	617.8
	100.054	0.027	617.8
	100.027	0.027	617.8
	100.000	0.027	617.8
第二 次量	107.570	0.027	617.8
	107.543	0.027	617.8
	107.516	0.027	617.8
	107.489	0.027	617.8
二次声速测量平均值(m/s)			617.8

的声速,表1给出了两个器件的测量结果,这些结果与理论值(分别为2104m/s和616m/s)及用其它方法得到的结果吻合得很好。这种方法所用仪器不复杂,容易掌握,测量精度比较高,能够直接测量加工好的器件(没有吸声体,且声光介质端面垂直于声传播方向),从而确定声光介质中声的传播速度。

## 五、小 结

本文给出了声光器件电输入阻抗的一般

表达式,证明了存在声驻波的器件的电阻抗随工作频率呈周期性的变化,且与声驻波的周期相同,基于该原理,提出了一种新的测量声光器件中声速的方法,实验结果验证了理论分析,从而证明了电输入阻抗一般表达式的正确性。

## 六、致 谢

声光器件由中国科学院光电技术研究所第六研究室声光器件组提供,黎俊杰、王富元同志对实验给予了热情帮助,特在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Sittig, E. K. IEEE Trans. Sonics. Ultrasonics., Vol. SU-16, No. 1, P. 2, (1969).
- [2] 徐介平《声光器件的原理,设计和应用》(科学出版社1982).
- [3] 冯慈璋《电磁场》(人民教育出版社)

(上接第39页)

是时候了,我们必须走自己的路,赶紧发展中国自己的采油声学研究和专用设备,未雨绸缪,迎接世界新技术革命的挑战。

## 参 考 文 献

- [1] Кузнецов О. Л., Ефимова С. А. Применение Ультразвука В Нефтедобывающей Промышленности. I Квартал 1983 Г. р. 76 р. 138-139
- [2] М. Ф. Двали, О. М. Сумароков НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО 1968. №2 р45-48.
- [3] 东华石油学院采油教研室,“采油工程”第三分册 p.1 09 1977年5月
- [4] Бидасюк А. Г., Скублевский Е. м. Нефть. И Газ. лром-стб №2. 1964. р49-51.
- [5] О. Л. КУЗНЕЦОВ, С. А. ЕФИМОВА А. В

ШУВИН. Т. Н. ЯГОДОВ В. Н. МАКАРОВ Н. С. МАРИНИН НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО 1981 №2 р67-70

- [6] АБДУЛЛАЕВ А. Н. МУДУЕВ М. М. СУЛТАНОВ Ю. Н. Нефтепромысловое ДЕЛО 1979 №7. р13-14.
- [7] Billyp. Morris. "Amer oil gas reporter" V18, №11 р58-59 FEB 1976
- [8] И. С. Дубинский, Ю. Ф. Жуйков. О. Л. Кузнецов, В. У. Уразганцев Нефтепромысловое ДЕЛО РНТС №16 р1-3 1978
- [9] T. R. Wright "World oil" V 191, №6 р79-85 Nov 1980
- [10] Albert G. Bodine U. S. P 3, 578, 081
- [11] А. М. ГАЕЫБИН А. В. КАЗАКОВА Ю. А. ПОЕЕУВНЫЙ Ц. А. СИДОРОВ П. М. УСАНЕВ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОЕ ДЕПО №9 р 18-21 1981.