

流体动力式发声器在采油工业中的应用研究*

路 斌[†]

(石油大学应用物理系 东营 257061)

摘 要 流体动力式声波发生器是一种有着悠久历史的声处理发生器,具有成本低廉、结构简单、坚固耐用以及动力源方便等特点.在采油工业中,利用这种声处理技术可以降低原油粘度,改善原油物性以及地层渗流条件,达到最终提高采收率的目的.文章论述了几种具有实际应用效果的流体动力式声波发生器在采油工业中的应用研究进展,并从作用机理、实验研究、现场应用等方面进行了详细的介绍.

关键词 采油,流体动力式声波发生器,哈特曼(Hartmann),帕尔曼(Pohlmann),旋笛

Application of hydrodynamic acoustic generators in oil production

LU Bin[†]

(Applied Physics Department, Petroleum University, Dongying Shandong 257061, China)

Abstract Hydrodynamic acoustic generators have long been in use for acoustic processing, due to their low cost, simple construction, durability and convenient power source. In the petroleum industry this kind of technology can be used to reduce the viscosity of crude oil, improve the physical characteristics of the oil and the percolation of the ground formation, and ultimately enhance the oil recovery. Several acoustic generators with effecting practical application in oil production are described with details of their mechanism, experimental tests and field applications.

Key words oil production, hydrodynamic sound generator, Hartmann, Pohlmann, siren

流体动力式声波发生器(以下简称发声器)是以流体为动力源,利用高速液体或高速气体来激发声波和超声波的发声器,主要包括迦尔登(Galton)发声器、哈特曼(Hartmann)发声器、帕尔曼(Pohlmann)发声器、旋笛以及圆板哨、旋涡哨等.从类型上分,可分为气流式、液流式和气液混合式三种.和其他声波发生器相比,流体动力式发声器的独特优点是结构简单、造价低廉、处理量大、工作条件要求低、经久耐用等.由于在石油生产中,原油通常是呈气、液、固三相共存的混合物溶液,具有非常好的流动性,因此非常适合流体动力式发声器的应用,开展这种发声器的研究工作也具有特殊的意义.本文着重介绍几种具有实际应用效果的发声器的应用状况,以期对从事物理法采油研究工作的同行有所帮助.

1 哈特曼(Hartmann)发声器

1.1 结构和工作原理

哈特曼发声器机械结构如图1所示,发声器主要由圆形喷腔和谐振腔组成.当流体从喷腔中高速射出时,由于喷腔截面的突然收缩,会使得喷腔前的流体压力呈现出周期性的变化.如果在压力的不稳定区内放置一个圆柱型的谐振腔,则形成一个谐振系统.当呈周期性压力变化的流体进入谐振腔后,会使谐振腔的压力逐渐升高并最终反馈出来,形成声波振荡.哈特曼认为^[1],不同尺寸的喷腔和谐振腔具有不同的固有频率,当喷腔的射流频率与谐

* 2003-07-02 收到初稿,2003-11-12 修回

† E-mail: lubin2990@163.com

振腔的本征频率一致时,就会产生强烈的振动声波,其频率可达几十至几百千赫兹。

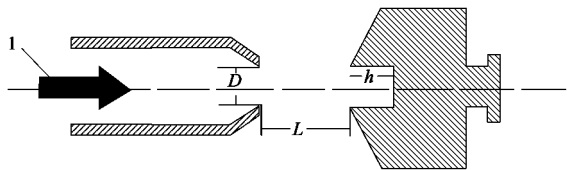


图1 哈特曼发声器结构示意图

(1 流体方向 D 喷腔直径 L 喷距 h 谐振腔深)

1.2 应用研究

在油田生产的中后期,地层能量补充不足,地下原油不能自动举升,采取的补救措施是利用注水井往地层中注水补充能量,达到水驱油的目的。由于低水质水源和地层杂质的污染,往往会使得注水井地层堵塞,导致注水压力不足,注水量达不到生产要求。我们将哈特曼发声器作为增注器,利用声波振动解堵作用,在注水井中使用后取得了良好的效果。

为了了解哈特曼发声器的工作性能,我们开展了相关的室内实验研究。研究内容主要包括了解发声器的频率特性、结构尺寸(谐振腔深、喷距、喷腔直径)对声器工作性能的影响,以及谐振频率、流压、声压等工作参数之间的关系,并最终优选出适用于不同井况的发声器型号。

利用测试传声器采集的示波器波形观察到,发声器的工作状态存在着谐振态、准谐振态、非谐振态,这也是以前的研究工作所未涉及到的问题^[2]。其中观察到的谐振态和准谐振态波形呈正弦分布,波形幅值较大,表明声波频率稳定,是需要利用的工作状态。相反,非谐振态的波形呈无规律的杂波,波形幅值较小,因而是需要避免的工作状态。谐振态和准谐振态下测得的声波频率与哈特曼的经验公式 $f = 340 \sqrt{4(h + 0.3D)}$ ^[3] 相吻合,式中的 h 为谐振腔深, D 为喷腔直径。

实验还发现^[2] (1)适当地增加喷距 L 后,激发发声器谐振的喷腔流压变化范围 ΔP 也相应地增大,说明增大喷距 L 后,入射流压即使存在一定的压力变化,仍可以激发发声器谐振,提高了发声器的工作范围。(2)在谐振态下,声压幅值 p 及其变化范围随着喷距 L 增大而增大,且喷距 L 增大后,谐振态发生在大流压的情况下,说明声压的增大是以提高机械效率为条件的。(3)谐振频率由谐振腔的本征频率决定,取决于谐振腔的几何尺寸。在喷腔直径 D 保持不变的情况下,谐振腔深 d 是决定谐振频率的

惟一因素,说明一旦发声器下入井底后,其工作频率将不能改变。此外还发现,在小喷距情况下,流压对谐振态的调节较为灵敏,在大喷距时迟钝,说明在小喷距时,流压的轻微变化就可以导致谐振态的产生或消失,流压对工作状态的调节能力降低,从而影响发声器的作用效果^[4]。这些重要的实验结果对现场应用提供了有意义的指导。

在上述研究的基础上,对喷腔直径为 3—12mm 不同型号的发声器进行参数优选,测试了谐振频率 f 与谐振腔深 h 、喷距 L 与流压变化范围 ΔP 和声压 P_s 之间的关系,描绘出相关的工作曲线,在实际现场应用中,可根据室内实验结果,结合现场注水井的日注入量和注水泵压力因素,根据不同型号发声器的工作性能,选择合适的发声器型号。

为了验证解堵效果,进行了相关的室内解堵实验,选择不同渗透率的岩心,用泥浆污染后进行声波解堵,分别比较岩心经声波作用前后的水测渗透率,计算出污染程度和解堵后的岩心恢复程度。实验结果表明,哈特曼发声器对于地层污染的确有效,在实验条件下,声波解堵可以使较高渗透率的岩心恢复 126.5%,较低渗透率的岩心恢复 177.1%,相对污染前的渗透率而言,恢复程度是高渗透率的好于低渗透率的,为了进一步验证实际应用效果,在胜利油田开展了一系列的现场试验工作,并取得了良好的效果。试验水井 6 口,平均单井日增注水量 55.2 m^3 ,有效期为 243 天,解堵有效率为 100%,满足了注水井的配注要求^[4]。

2 帕尔曼(Pohlmann)发声器

2.1 结构和工作原理

帕尔曼发声器的基本结构主要由高速喷腔和反馈簧片组成。喷腔带有一个长方形的窄缝喷口,与簧片保持正对位置,喷腔是流体激发源,属动力系统。簧片是一种机械式共振器,属能量反馈系统,通常簧片的材料主要由黄铜或不锈钢制成。这种声波发生器是 1948 年由 Pohlmann R 和 Janovsky W 首先发明并应用于工业中的,所以也称之为 Pohlmann - Janovsky 哨。帕尔曼发声器的类型主要包括支点式和悬臂式两种,我们采用的是悬臂式发声器,结构如图 2 所示。悬臂式的一端固定,另一端可自由振动,这是一种改进型的发声器,振动效果要好于支点式,流体自窄缝喷口喷出后,由于流速较快以及流体粘度的作用,在射流轴线两侧将产生两串涡流,涡流在窄缝的两边轮流发出,旋转方向相反,这些涡流旋转

会导致射流横向上流压的脉动性变化,也是产生发声器宽带谐波的主要原因.如果在喷口前放置一个簧片,就会产生强烈的边棱音,同时也激发出簧片尖劈上的局部流体振荡.喷口射出的喷注受到横向不稳定的扰动,流体的冲击力以及涡流与尖劈相互作用,形成一个强有力的声发射系统^[5].

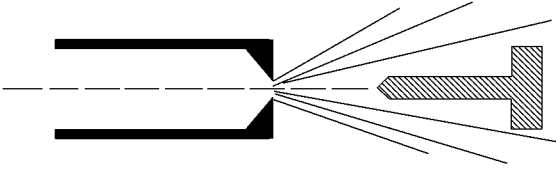


图2 帕尔曼发声器结构示意图

2.2 应用研究

在应用研究中,主要开展了帕尔曼发声器在声波防蜡方面的研究.我国含蜡原油的产量较大,在含蜡原油的开采过程中,随着温度的不断降低,原油中析出的蜡晶数量增加,并形成网状结构.当这些网状结构达到一定强度后,原油将失去流动性而凝结,从而严重影响原油的正常生产和输送.利用帕尔曼发声器产生的声波振动可以有效地破坏蜡晶的网状结构,降低原油的凝固点,起到防蜡降粘的目的.

在室内实验方面,主要开展了声波处理高含蜡原油的降粘研究.取来自现场的高含蜡原油进行声波处理对比实验,在实验条件下发现,经声波处理后,原油粘度明显降低,在27℃的相同温度下,原油粘度由200mpa·s降为42.5mpa·s,降粘率为78.8%.为了进一步研究声波对含蜡油的作用机理,实验还对含蜡25%的溶蜡油在声波处理前后的蜡晶结构进行了显微镜下的观测研究,以了解声波对蜡晶结构的破坏作用.在高倍显微镜下可以观察到,经声波处理后,蜡晶的网状结构被明显地破坏,蜡晶微粒变小并呈均匀分布,并存在较长的滞后时间,不可逆转效应明显,为声波防蜡提供了较有说服力的实验证据和理论依据.

目前,将帕尔曼发声器作为声波防蜡器的应用已经取得了显著的效果,先后在大港、胜利、大庆、辽河、江苏、华北以及中原油田进行了广泛的推广,以辽河油田茨榆坨采油场的现场报告为例,对10口结蜡严重的油井实施工艺后,热洗周期最少延长了60天,油井电机负载明显下降,累计增产原油259.4吨,减少热洗井15次,创经济效益34.6万元.

3 旋笛

3.1 结构和工作原理

如图3所示,旋笛主要由定子、转子以及驱动电机构成.定子是一个圆形盖板,沿盖板的圆周上钻有小孔,通常称为导流孔.在定子的下方,装有带同样导流孔的转子,转子连在电机轴上,可由电机带动旋转.定子和转子上的导流孔分布在同一半径的圆周上,二者的数目可以相同,也可以不同.转子在电机的带动下,定子的导流孔时而被转子所覆盖,时而与转子上的导流孔相吻合,这样,当高压流体经流体入射孔进入旋笛后,流体就通过导流孔产生脉动性的流体柱,这些流体柱会对周围的流体介质产生周期性的冲击压力,从而产生声波和超声波.在理想情况下,转子和定子应紧密连接,这样有利于提高发声器的效率,但在转子高速旋转时要完全密合是不现实的.在不影响转子高速旋转的条件下,二者间的间隙应尽量缩小,这样对机械加工精度提出了较高的要求.

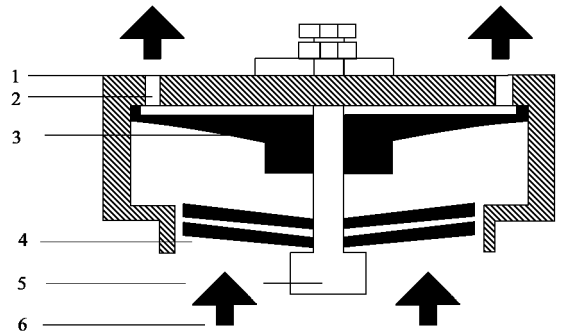


图3 旋笛发声器结构示意图

(1 定子 2 导流孔 3 转子 4 叶导体轮 5 电机 6 流体方向)

3.2 应用研究

在处于生产中后期的油井中,通常原油是通过井底电潜泵的举升被采出的.由于原油粘度和油垢的影响,电潜泵工作电流会逐渐升高,工作效率下降,严重时甚至会烧毁电机.根据旋笛的特殊构造,开展了旋笛对电潜泵降粘防蜡的应用研究.首先在电潜泵的叶导轮之后安装旋笛式发声器,电机上的叶导轮用于加压液流.在高速流压下,流体周期性地通过导流孔,激发声波的产生.为改变发声器的声波频率和电潜泵流量,利用变频器控制电机转速.在室内实验中,选取胜利油田河口采油厂提供的现场油样,测量粘温曲线后进行降粘处理,结果表明,经发声器处理后,原油粘度明显下降.在温度为24℃的条件下,在开泵初期,粘度由开泵前的1000mpa·s降为550mpa·s,降粘率为45%,开泵23分钟后,粘度下降为230mpa·s,降粘率为77%,且逆转时间为5小时.由此可见,旋笛发声器具有较好的降粘效果.经实验验证,安装旋笛式发声器后,电潜泵过流

正常,不影响排量要求;分析频率-粘度曲线和声压-粘度曲线可知,降粘效果和声波频率不呈线性增加,并非频率越高降粘效果越好;在相同频率和作用时间的条件下,声振幅越大,降粘效果越好。

在防垢实验中,参照石油天然气行业标准 SY/T5673-93 中抑制硫酸钙垢形成的方法,采用挂片法进行。首先在发声器的入口和出口处的不同位置放置挂片,以高浓度矿化水为工作液,开泵循环一段时间后,计算挂片的防垢率,公式为 $(\Delta M_1 - \Delta M_2) / \Delta M_1 \times 100\%$, 式中 ΔM_1 为未经声波处理挂片的结垢质量, ΔM_2 为经声波处理后的结垢质量。实验结果表明,在声器入口和出口处挂片的防垢率为 85.5%—99.01%。同时,还研究了水浴静态挂片的结垢情况,其中声处理后的挂片与水浴静态下的挂片比较后的防垢率为 85.4%—99%,而循环水和水浴静态下的防垢效果无明显区别。相关现场工作,目前正与胜利油田开展现场应用研究,已取得阶段性成果。

4 流体动力式发声器在采油工业中的应用现状和发展前景

目前我国的大多数油田处于中晚期,由于普遍采用水驱和化学驱,原油含水率高达 90% 以上,具有非常好的流动性,从而为流体动力式发声器提供了广阔的应用前景。早在 20 世纪 80 年代,我国就开展了声波采油的应用研究,国内许多采油专家对声波技术进行了各种尝试,开展了深入的室内实验及现场应用研究。目前流体动力式发声器的应用领域主要包括 (1) 油水井解堵,提高近井地带地层的渗透率,使低产井甚至死井恢复生产 (2) 降低原油粘度,改善原油的流动性,这无论是对井下采油还是井上油气集输,都有着良好的应用效果 (3) 防蜡清蜡,使原油中的石蜡粉粹为极细的微粒悬浮于原油

流体中,并可使长链烃分子发生断裂,从而降低其固化温度,降低防蜡成本 (4) 提高其他采油方法的作用效果。如产生声化学作用,使化学采油中的化学剂得到充分的利用,利用声波酸化,可有效地提高酸化效果;与注气井结合后可以提高岩石的导热速度,使热渗流距离增加,强化采油效果。

在各种物理法采油方法中,声波采油是起步较早且发展较为成熟的一项技术。早期的研究重点主要集中在压电式声波发生器方面。由于压电式换能器对工作环境要求较高,需附带大功率的信号源,因而在推广应用中受到许多限制。相比之下,流体动力式发声器不需附加的动力源,对工作环境要求低,尤其是可在井下长期工作,不影响油井的正常生产,因而在石油生产领域中具有广泛的应用前景。从目前的应用现状看,流体动力式发声器虽然在某些采油领域取得了一定的发展,但还有很多工作需要加强进一步的研究,尤其是如何改善流体动力式发声器的声学特性,研制大功率的发声器,是亟待解决的问题。实事求是地说,到目前为止,在应用中还有不少技术问题有待提高,对发声机理也需加强进一步的研究。本着抛砖引玉的目的,本文只是简单地介绍了相关的研究进展,衷心希望从事物理应用开发的同行加入这项有意义的工作,使物理技术在石油工业中得到更好的推广和应用。

参 考 文 献

- [1] Hartmann J. Phys. Rev., 1932 (2) 719
- [2] 路斌. 石油矿场机械, 2001, 30(5) 8 [Lu B. Oil Field Equipment, 2001, 30(5) 8 (in Chinese)]
- [3] Hartmann J. Phil. Mag., 1931(7) 926
- [4] 路斌. 江汉石油学院学报, 2002, 24(1) 68 [Lu B. Journal of JiangHan Petroleum Institute, 2002, 24(1) 68 (in Chinese)]
- [5] 马大猷. 声学手册. 北京: 科学出版社, 1983. 200 [Ma D Y. Acoustics Manual. Beijing: Science Press, 1983. 200 (in Chinese)]

封 面 说 明

由于全固态激光器具有体积小、效率高、寿命长、光束质量好等特色,在信息、先进制造、医疗、环境、科研和国防等领域有广泛的应用前景,对这种新一代激光器的开发已成为国际激光界特别关注的研究领域。红、绿、蓝三基色全固态激光器用于全色显示,并且激光色纯度极高。与现有的灯光投影显示相比较,激光显示具有以下不可取代的优势:第一,色饱和度高,色彩最鲜艳;第二,色度三角形最大,是传统灯光显示色域的 2.33 倍。因此,所显示的自然色彩最真实、最丰富,甚至可显示虚拟色彩。要实现全色显示,红、绿、蓝三基色激光首先需要匹配成白光。要匹配成白光,需要满足两个条件:三基色激光要达到功率匹配,三基色激光要达到空间匹配。在我们的演示实验里,自然界中的红花绿叶,蓝天白云,青山绿水,碧绿草原,沙漠荒丘都在这里得到了真实的显示。虚拟色彩也在这里得到了完美的展示。充分展示了激光显示色饱和度高,色域大,色彩艳丽的优点。

(中国科学院物理研究所 姚爱云)