

帕尔曼发声器在原油防蜡降粘方面的应用*

路 斌[†] 关继腾 张建国

(石油大学应用物理系 山东 东营 257061)

摘 要 作为物理法采油技术的一种新应用,声波技术在原油防蜡降粘方向取得了有效的应用效果.文章论述了帕尔曼发声器在原油防蜡降粘方面的研究,从作用机理、实验研究、现场应用方面进行了详细的介绍.

关键词 物理法采油,声波,帕尔曼发声器,防蜡,降粘

THE APPLICATION OF POHLMANN'S WHISTLE ON CRUDE OIL WAX CONTROL AND VISCOSITY REDUCTION

LU Bin[†] GUAN Ji-Teng ZHANG Jian-Guo

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

Abstract As a new application in oil production the acoustic wave technique has an effective influence on wax control and viscosity reducing. We present result of our research on wax control and viscosity reduction with the help of Pohlmann's whistle, describing in detail the mechanism, experiments and field tests.

Key words physical oil production, sonic wave, Pohlmann's whistle, wax control, viscosity reduction

在很早以前,人类就发现了利用简单空腔来产生声音的现象,也就是我们经常见到的口哨,这也许是流体动力式声波发生器的最早雏形.迦尔登(Galton)所发明的气体笛管,是根据科学原理设计的利用流体动力作为声源的第一个尝试,它的基本原理和设计至今尚无重大改变,其主要结构包括喷嘴和一个面向喷嘴的谐振腔,通过喷嘴射出一高速气流后,经谐振腔反馈产生声波与超声波.迦尔登笛管最初用于发出警报,并取得了良好的效果.一般说来,流体动力式声波发生器是指以流体射流为动力源来激发声波的机械式发声器,所采用的流体介质主要是空气和水.对于空气介质,迦尔登发声器就可产生良好的效果,但如果要在液体中激发声波振动,则迦尔登哨的效率是比较低的,主要原因是由于迦尔登发声器是通过金属谐振腔来反馈气流的,对于空气-金属界面,声波发射系数可高达99.99%,但在液体-金属界面上,反射系数却相对要低得多,因此在水中迦尔登哨是不能很好地发挥效率的.为此,物理学家帕尔曼(Pohlmann)于1948年发明了一种可在液体中激发声波振动的发声器,又称为帕尔曼哨^[1],从而有效地解决了液体中的发声问题.最初的帕尔曼发声器主要用来生产乳状液,利用这种设备可以使油和水粗略地被混合,然后不断地被循环,直到乳

状液达到所需要的要求.别的用途还包括药物和化妆品的制造,如用于生产面霜以及鱼肝油之类的混合物.食品工业利用帕尔曼发声器来生产汤料,淡饮料业用来制造水果精.

在石油工业中,通常原油是呈液态的气、液、固三相共存的混合物溶液,其中的固态物质主要是含碳原子数为16—64的烷烃,这种物质叫石蜡.当温度低于蜡的析出温度时,原油就会呈现出明显的非牛顿流体特性,析出的蜡晶微粒相互形成网状结构,并以结晶形式沉积在油井管壁上,出现结蜡现象.结蜡所带来的严重危害会导致油井管径缩小,粘度升高,原油流动性差,特别是对于抽油机井,极易造成抽油杆断脱,因此,油井结蜡是影响油井稳产的突出问题之一,防蜡降粘是油井管理中的重要内容.目前的清防蜡方法主要包括机械清蜡、热力清蜡和化学清蜡,其主要的缺点在于作业成本高,作业次数频繁,需停井作业,特别是防蜡效果不明显;而以流体作为动力源的帕尔曼发声器却具有成本低、不影响正常的油井生产、可长期作用等优点,因此很适用于声波防蜡.作为流体动力式声波发生器在现代石油

* 2001-11-05 收到初稿,2001-12-26 修回

† 通讯联系人. E-mail: lubin2990@163.com

工业中的新应用,本文介绍了帕尔曼发声器在原油防蜡降粘方面的应用情况,以期对希望从事物理法采油技术研究工作的同行有所帮助。

1 帕尔曼(Pohlmann)发声器的结构和防蜡降粘机理

帕尔曼发声器由带有收缩喷嘴的喷腔和反馈振动簧片组成。喷嘴是一个长方形的窄缝喷口,与簧片保持正对位置。通常簧片的材料由黄铜或不锈钢制成,为了减少流体流动时的能量损失,簧片的前端设计成一定斜度的尖劈,以保证流动的顺畅。流体从窄缝喷口喷出后,射流喷注冲击簧片产生振动,从而激发声波发生。在油井生产中,我们设计了与油管连接的上下接头,可将声波发生器的两端分别与井下管柱的上下螺纹相联接,上下接头的内流道构成发声器的液流出口与进口,发声器随油泵一起工作,不需外加其他动力。具体机械结构如图1所示。

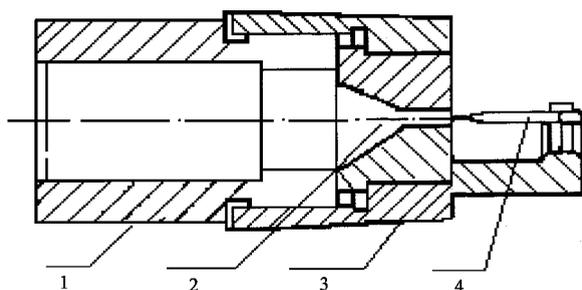


图1 帕尔曼发声器结构示意图

(1为下接头 2为收缩喷嘴 3为上接头 4为振动簧片)

声波防蜡的机理可归结为声波的直接机械作用以及三项基本效应,即辐射压力、声流和空化^[2],在高声强的声波作用下,机械振动和空化所产生的高压力使蜡晶体的网状结构被充分粉碎,使石蜡在未凝结前就成为极细的微粒悬浮于流体介质内。同时,声波在井筒内沿径向方向的传播,会使石蜡在井壁上的附着力降低,提高油井管壁的光滑度,达到亲油憎蜡性。声波的传播还可使层流变为湍流,加强液液对管壁的冲刷作用,便蜡不易沉积在管壁上而随油流冲走。

2 帕尔曼发声器在原油防蜡降粘方面的应用

开展的应用研究工作主要包括发声器性能参数优选、室内实验研究、现场应用三个方面。实验测量

装置由水箱、帕尔曼发声器、水听器、数字存储示波器以及数据采集分析系统组成。发声器和水听器置于水箱中,通过水泵循环水箱中的水激发发声器工作。设计的发声器喷口宽度为8cm,厚度可调,簧片宽10cm,厚2mm,长度20cm。测量装置如图2所示。

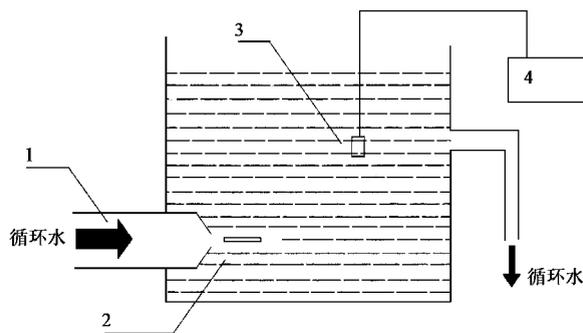


图2 实验测量装置

1为循环水流 2为声波发生器 3为水听器;
4为示波器和数据分析系统

2.1 发声器性能参数的优选

室内实验研究了影响声振动频率和声振动强度的参数关系,目的是为了获得高声强的振动声波,以增强作用效果。在实验效果的基础上对发声器进行了参数优选。

在保持喷口与簧片的几何尺寸不变的条件,声波频率的大小取决于喷口流速 u 与喷距 d (喷口与簧片的距离)。实验结果表明,频率与喷距成反比,与流速成正比,由此可推测出频率公式为 $f = ku/d$,式中的参数 k 与簧片材料的弹性模量以及流体性质有关。关于 k 值,在实际应用中可采用图表法确定其大小。布朗(Brown)曾对帕尔曼发声器的频率发表了如下的经验公式: $f = AJ_N u/d^{[3]}$, J_N 为工作方式的函数,与我们的测量结果基本相符。此外,还观察到在流速为0—26m/s的变化范围内,发声器在流速为6m/s,11m/s,12m/s,26m/s时观察到四次共振状态,对应频率为0.7kHz,1.19kHz,1.83kHz,2.75kHz,说明并非任何流速条件下都能激发声共振状态;对于喷距,同样也存在着一个有效工作范围,当喷距过小或过大时,都无法产生有效的共振。由此可得出以下结论:要得到高频声波的主要手段是提高流速和减小喷距,但必须注意到二者存在着一个有效范围,过高或过低的喷距与流速都无法激发有效的共振。

实验还研究了声振动强度与流速、喷口缝宽以及喷距的关系。研究表明,声振动强度随流速的增大而增强,随喷距的增大而急剧下降,当喷距大于5cm

或者小于 2cm 时, 振动就变得极不稳定, 此时, 即使提高流速, 也不可能得到理想的共振状态. 喷口缝宽对声振动强度的影响是很大的, 在谐振点上, 较窄的喷口所激发的强度比较宽的喷口强得多. 这种现象可以解释如下: 一方面, 喷口射出的喷注被簧片切开而均匀地流过, 激发簧片产生振动; 另一方面, 喷注流过簧片时, 也对簧片的横振动产生一个制动效应, 就如同把簧片挤入一个“活动虎钳”一样, 使振幅减小, 声强降低. 因此, 为了获得高强度的声振动, 应减小缝宽, 但由于油泵排量的限制, 应确定一个最佳宽度, 在此宽度下, 制动效应最小.

根据上述实验结果, 设计喷口的厚度为 2—3mm, 宽度根据油泵排量确定, 喷距为 2—4cm, 簧片尺寸为厚 2mm, 长 20cm, 宽度随喷口宽度可调. 根据实际生产的需要, 我们设计了四种型号的发声器, 分别适应于日产 10、20、30 和 30m³ 以上产液量的油井.

2.2 声波降粘防蜡的应用实验研究

为了研究声波作用对含蜡原油的影响, 还开展了声波降粘防蜡的实验研究. 取现场高含蜡原油, 在油箱中加热到预定温度后保温, 循环进行声波处理, 测定处理前后粘度的变化. 为了在显微镜下得到清晰的图像, 以柴油作为溶蜡油配制了不同含蜡量的含蜡油进行实验, 拍摄了不同情况下蜡晶结构的图像, 为防蜡机理的研究提供了直观的实验结果. 取胜利油田的史 8—24 井油样进行室内实验. 该油样胶质含量为 5.97%, 沥青质含量为 0.84%, 含蜡量为 20.44%. 测定该油样声波处理前后的粘度温度数据, 结果见图 3. 可以看出, 经声波处理后, 粘度明显下降. 在 27℃ 相同温度下, 原油粘度由 200mPa·s 降为 42.5mPa·s, 降低了 157.5mPa, 降粘率为 78.8%.

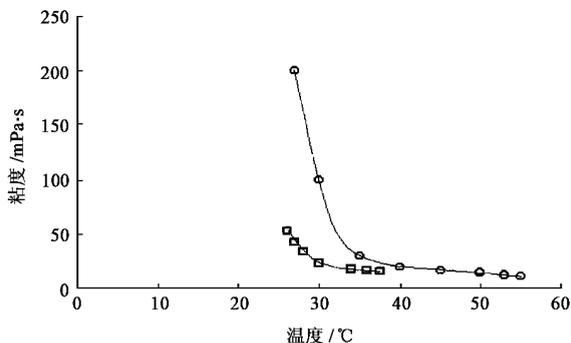


图 3 胜利油田史 8—24 井原油声波处理前后粘度—温度曲线

对 25% 溶蜡油进行声处理, 在显微镜下进行观察, 结果如图 4、图 5 所示. 可以看出, 未经声波处理

时, 蜡晶结构呈现出均匀网状结构, 处理后, 蜡晶结构受到破坏, 微粒结构变小并呈均匀分布, 这有力地证明了声波防蜡机理的正确性, 为进一步研究和完善声波防蜡降粘技术提供了理论依据.



图 4 声波处理前溶蜡油晶体结构 (放大 400 倍)

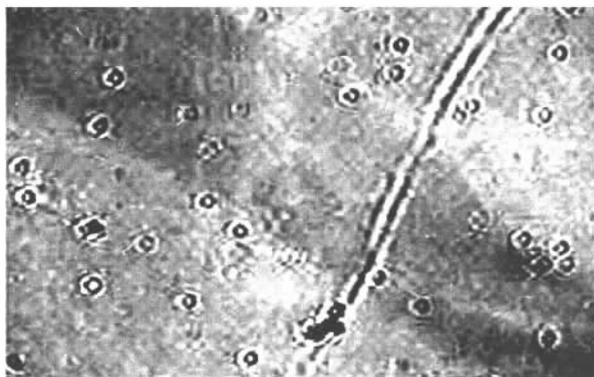


图 5 声波处理后溶蜡油晶体结构 (放大 400 倍)

2.3 现场应用报告

该项技术在油田推广以来, 取得了良好的效果. 以胜利油田试采二厂的现场报告为例, 报告中指出, 在三口粘度较高、结蜡严重的油井试验后, 电机负荷下降了 16.9kN、18kN、9.4kN, 延长结蜡周期 3 倍以上, 说明该技术降粘防蜡效果明显. 通过计算表明, 三口井创造纯经济效益 71.39 万元, 投入 2.1 万元, 投入产出比为 1:34. 目前这项声波防蜡降粘技术已申请了国家专利, 获得山东省科技进步三等奖, 先后在大港、胜利、大庆、辽河、江苏、华北以及中原石油管理局进行了推广, 取得了较好的经济效益和社会效益.

3 结论与展望

室内实验和现场测试表明, 声波防蜡降粘技术是一种有效的物理法采油新技术, 可以延长油井的结蜡周期及免修期, 增加产液量和产油量, 降低抽油

机负荷,起到节电降耗的功效。

由于流体动力式发声器结构简单,坚固耐用,处理量大,耗电量小以及它的动力源的方便性,因而很适合于工业上应用。目前在石油工业中,已广泛应用于解堵、防垢、增注、除蜡、降粘、乳化、粉碎,以及用于促进化学反应等等。和其他声波及水力振动技术相比,已显示出它的独特的优点,从而展示出它的巨大生命力。然而,由于流体动力式发声器是用流体射流作为动力源来激发声波的,而射流的流体动力学是一个较为复杂的课题,射流与腔体的耦合发声所涉及到的数学处理也非常困难,因而至今相关的发声机理还没有得到较为令人满意的解释。目前大部分的研究仅限于有关实验现象分析,在一系列的应用中,主要是基于经验公式以及具体实验曲线给出

的结果与特征趋势来考虑问题。因此,关于声波采油的研究还亟待进一步加强,尤其是在声波发生器性能的研究和提高方面。本文只是简单地介绍了我们关于声波防蜡降粘技术的一些研究结果,我们衷心地希望有更多的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应用和推广。

参 考 文 献

- [1] Janovsky W, Pohlmann R. *Physics*, 1948 222
- [2] 马大猷. 声学学报, 1992, 17(4): 241 [Ma D Y. *Acta Acustica*, 1992, 17(4) 241 (in Chinese)]
- [3] Brackenridge J B. J. *Acoust. Soc. Amer.*, 1960(32): 1237
- [4] 应崇福. 超声学. 北京: 科学出版社, 1990 [Ying C F. *Ultrasonics*. Beijing: Science Press, 1990 (in Chinese)]

· 前沿和动态 ·

碳纳米管的新应用——最小的温度计

最近,来自日本材料科学国家研究院的 Gao 等人将液态金属 Ga 装入碳纳米管,制成了世界上最小的温度计。碳纳米管的直径只有 75 nm,长度约 10 μm 。它在 20—500 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内可以保持其内径不变,其线膨胀系数仅为 $-1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。金属 Ga 在 29.78—2403 $^{\circ}\text{C}$ 的温区内呈液态,并且具有极低的蒸气压。因此,在特定温度下,纳米温度计中 Ga 液柱的高度由 Ga 的总体积唯一地决定。Gao 等人对准一维液态 Ga 的实测表明:其体积随温度线性变化,即 $V = V_0[1 + \alpha(t - t_0)]$,其中 t_0 和 V_0 是参考点的温度和体积。在 30—977 $^{\circ}\text{C}$ 之间,体膨胀系数 $\alpha = (0.095 \pm 0.006) \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。这个准一维 α 值,与宏观状态的液态 Ga 的体膨胀系数非常接近,与此形成鲜明对照的是:微观表面效应将使其他热特性(如熔点)有较大的漂移。

碳纳米管温度计采用垂直射频炉进行制备。 Ga_2O_3 和纯的非晶态活性碳(按 7.8:1 混合)原料被置于碳坩埚中,最高炉温是 1360 $^{\circ}\text{C}$,用 N_2 气保护。化学反应的一次生成物是 Ga_2O 蒸气和 CO 蒸气,但

在炉子的顶部温度较低处(800 $^{\circ}\text{C}$)二次生成物是液态 Ga、固态碳和 CO_2 蒸气,其中前两项构成纳米温度计。

在碳纳米管内,液态 Ga 柱的弯月面较平坦,并且总是与碳管的内壁垂直。实验者利用扫描电子显微镜,观察碳管中 Ga 液态柱高度的变化,完成了对温度计的检定。结果表明,在 50—500 $^{\circ}\text{C}$ 的温区内, Ga 液柱高度 h 作为温度 t 的函数是线性关系,并且升、降温过程的重复性也很好。被测试的一支纳米温度计,其中 Ga 液柱的连续长度达 7560 nm,定标曲线可以表示为 $t = 58 + \Delta h/0.753$,其中 Δh (以 nm 为单位)是与参考点 58 $^{\circ}\text{C}$ 和被测温度 t $^{\circ}\text{C}$ 相应的高度变化。这就是说,温度计的灵敏度是 0.753 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。预计,这种纳米温度计在各种微环境中将具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Gao Y *et al.* *Nature*, 2001 415 599
(中国科学院理化技术研究所 戴闻)