

# 无污染物理采油新技术\*

路 斌<sup>†</sup> 关继腾

(石油大学应用物理系 东营 257061)

**摘 要** 无污染物理采油技术是继化学采油技术之后发展起来的一种油层处理新技术,具有化学采油方法所不具备的许多优点.文章介绍了目前物理技术在采油工程中的应用状况,论述了各种物理采油技术的作用机制和工作原理,并对目前该项技术在我国的发展状况进行了分析,指出了一些需要注意的问题.

**关键词** 物理技术 物理法采油 采收率

## A NEW PHYSICAL OIL PRODUCTION TECHNIQUE WITHOUT POLLUTION

LU Bin GUAN Ji-Teng

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

**Abstract** A physical oil production technique which is pollution free and has many advantages compared with chemical techniques is described. We review the various physical principles and mechanisms physical oil production, analyse the current development in China, and point out the problems that need to be noted.

**Key words** physical technique, physical oil production, enhanced oil recovery

### 1 引言

石油是国民经济发展的重要能源基础,通常在油层有利的条件下原油采出程度不超过地质储量的50%,对于一些高粘低渗透油田,采出程度则更低.传统的开发方法是以化学驱为主的采油技术,也包括注水驱、二氧化碳驱、水蒸汽驱等,其所固有的共同缺陷是会产生不可逆转的负效应,造成油层伤害,使得无法继续采用有发展前途的其他采油方法,同时,从保护和利用资源的角度看,也要求对油层进行无污染处理,物理采油技术正是符合这一条件的新技术.物理采油技术利用不同性质的物理场处理油层,引起油层的物理、化学性质发生变化,改善油层的渗流情况,达到提高原油采收率的目的.根据作用方式和原理的不同,物理采油技术主要包括微波技术、磁技术、电场技术、振动采油技术和超声波技术等.和化学方法相比,物理采油技术最突出的优点是对油层无伤害,无污染,此外还包括作业方式灵活,

适用范围广,工艺简单,操作方便,成本低廉,易和化学采油技术进行优势互补等优点.本文介绍了各种物理采油技术的作用机制和原理,分析了我国在这方面的技术状况和应用规模,以期对希望从事物理法采油研究工作的同行有所帮助.

### 2 微波技术

微波采油技术是指将大功率的微波天线下到要作用的油层位置,或用传输的方法将微波传到地下,对油层直接加热,降低原油粘度,提高采收率.主要利用微波热效应的开采方法称为微波加热采油技术,利用微波裂解效应的方法称为微波汽化采油技术.目前,国外对微波采油的研究已取得一系列成果,许多公司投入了大量的资金和力量开展这方面的研究.美国芝加哥伊利诺易斯工学院在南俄克拉荷马油层的试验,打一口专用微波采油的试验井就

\* 2001-07-03 收到初稿,2001-09-13 修回

† 通讯联系人, E-mail: LuBin58@etang.com

耗资几百万美元,由此可见微波采油技术的重要意义<sup>[1]</sup>。近十年来,我国对微波采油技术的研究有了很大进展,特别是1996年该技术被正式列为“国家863计划”,这使微波采油技术的研究变成了国家计划,加速了研究进程。目前设计的微波采油方法有三种:(1)地面加热法。通过地面微波加热处理装置,对注入地层的水或水蒸气加热,此方法优点是不用改变现有井口设备,不需动管柱,施工方便。(2)井下加热法。将微波源直接放入井下,使地层温度升高。(3)多底井地层微波加热。该方法具有最佳的作用效果和作用效率,其作用原理如图1所示。微波沿竖井段向下传到多连通器中的功分器,并与开窗侧钻的水平井内的天线相连通,微波能量通过水平天线向地层辐射。在这种结构中,由于在同一油层中可以钻探多条水平井,因此可以有效地提高微波辐射的作用效果,这种结构的有效作用半径和效果决定于开窗侧钻的水平井的个数和沿水平方向延伸的距离。

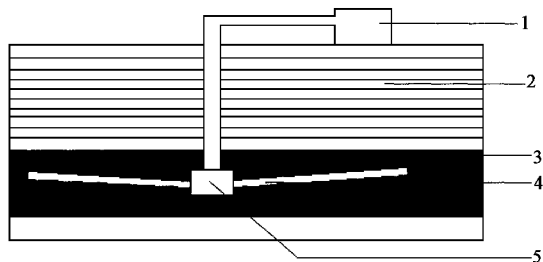


图1 多底井微波加热示意图

(1 电源 2 地层 3 油层 4 水平辐射井 5 功分器及储油空间)

目前认为微波的采油机理主要包括三个方面,即加热作用、造缝作用和非热效应。在微波场中所产生的热量大小与介质的种类及其电特性有关,与以热传导和热对流为主的外加热不同的是,微波的加热过程是在介质内部进行的,故称为内加热,其最大的优点是加热速度快,向外辐射和传导损失的热量较小。造缝作用是由于油层由不同的化学物质组成,非均质性特点明显,在微波作用下不同介质的温升亦相差较大,热膨胀、冷收缩不均匀,致使岩石产生很多微裂隙,特别是在低渗透油田中,微裂隙的产生可大幅度地提高产量和采收率。微波的非热效应指微波频率接近油层流体中极性分子的固有频率时,极易引起强烈的共振,导致油品中长链分子化合物的结合断裂,部分高粘重质油成为低粘轻质油,改进了指进现象,渗透率大为提高,最终达到提高采收率的目的。

微波采油技术主要适用于稠油和低渗透油田的

开发。我国蕴藏着丰富的稠油资源,其主要特点是沥青质含量高,粘度大,流动性差。据统计,目前已探明的未开采稠油储量约为  $1 \times 10^8$  t,可见将高频电磁能传给油层的微波采油技术是一种极具前途的稠油开采方法。然而,尽管微波采油技术具有很大的开发优势,但目前还基本上处于实验室研究阶段,没有进行广泛推广,其主要原因是有一些难点至今未能解决好,包括大功率微波装置的研制,微波发生器的频率控制以及加热的合理时间,作用机理和技术经济性以及地层能量亏空问题等仍是一些亟待解决的问题。

### 3 磁处理技术

利用磁场对原油及驱替液的物理、化学性质的影响,可使经磁场处理后的流体物性发生变化,产生降粘、降凝、防蜡、增注等作用。磁处理技术在油田工业中的应用起步较早,早在1985年,大庆油田就开展了磁防蜡的应用试验,并取得了成功。目前我国的各大主力油田均建立了专门的磁技术研究机构,进行了系统的基础和应用研究,为有效地保护石油资源,避免和减少油层污染,提供了一种新方法。据不完全统计,磁技术在整个石油工业中创造的直接经济价值已达数亿元以上。从手段上看,磁场的建立有两种基本方式,一种是通过电磁铁建立磁场,另一种是利用永磁体建立磁场。由于电磁铁的体积大,在石油矿场实际应用得较少,绝大部分磁处理装置采用的都是稀土永磁材料。根据安装方式的不同,石油矿场上应用的磁处理装置可分为内置式和外置式。内置式通常用于井下处理,外置式大多使用在原油输送管道上,其基本结构如图2和图3所示。大庆油田经过多年的研究,设计出多种用途的磁处理器,主要包括磁防蜡器、磁增注器和磁防垢器,取得了良好的应用效果和经济效益。现场试验表明,经磁防蜡技术处理后,原油的粘温曲线出现下移,凝固点可下降  $2\text{—}7^\circ\text{C}$ ,防蜡周期可延长  $9\text{—}16$  倍,有效地延长了热洗周期,利用磁注水技术,可将日注水量由  $301\text{m}^3$  上升到  $340\text{m}^3$ ,提高率为  $13.3\%$ ,此外,将磁防垢技术应用到现场后也取得了较好的成效<sup>[2]</sup>。

关于作用机理,目前存在两种理论解释模型,“磁致胶体效应”理论认为,在磁处理应用见到效果时,流体中析出的粒子细小而弥散,粒子的尺度可视作胶体范围。磁处理促进了胶体粒子表面双电层的形成,使原来不断形成又不断消失的粒子,由于表面

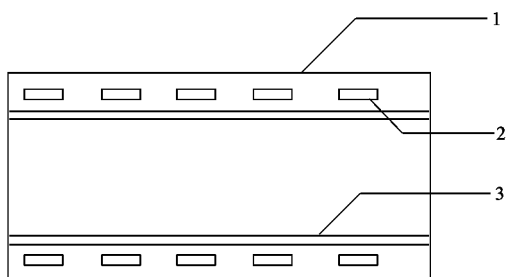


图2 内置式磁处理装置图  
(1. 外壳 2. 永磁体 3. 不锈钢内管)

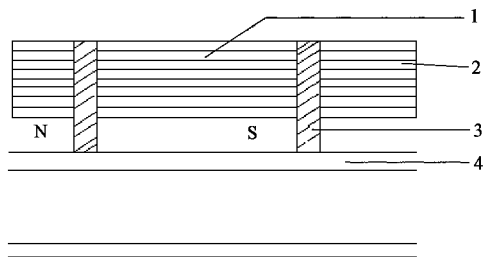


图3 外置式磁处理装置图  
(1. 磁铁 2. 外壳 3. 磁极 4. 输油管)

形成亚稳状态的双电层得以稳定的存在,也使得磁处理具有了所谓的“记忆”效应,由此产生了磁降粘、磁增注等一系列效果。“氢键异变理论”认为,在油水气及岩石矿物的油藏体系中,除水外还有很多能够形成氢键的分子和粘土矿物,氢键在很大程度上抑制着分子相互作用的大小和性质,也是造成一些物质的物理化学性质发生变化的根源。施加磁场后,虽然还远不足以使氢键发生断裂,但可以给其体系一扰动,造成分子间新的排列组合,使油体在不同条件下表现出某些物理化学性质的变化,其中的一些变化十分有利于油气开采。

磁处理技术的应用范围十分广泛,主要包括以下几个方面:油井磁防蜡技术,用于解决油井结蜡问题,延长热洗周期,节约清防蜡成本;磁减阻输油技术,解决了高粘原油地面集输困难的问题,达到节能降耗的目的;磁增注技术,对水井注入水进行磁处理,降低注入压力,提高吸水指标和水驱油效果。

## 4 电场技术

电场可以对油层产生电热、电化学、电渗透、电驱动等效应,影响流体的物理化学性质的改变。电场技术在采油领域的应用主要是电加热采油。电热采油技术又称电磁加热法(EMH),通过能量转换装置,

将电场能量传入油层,利用介质热损耗机理转换成热能,提高近井油层的温度,使原油从油层中流入井内,其主要作用对象是稠油油田和低渗透油田。EMH技术的成功性取决于介质吸收电磁能的特性,如果介质由双极性分子组成(如水分子),通过的电磁波就会促使这些极性分子向两极运动,在振荡电场中重新排列,成为规则的线性组合。极性振荡分子在与相邻分子相互作用时产生摩擦热,从而提高介质温度。EMH工艺需要两种特别的设备,无线电频率发生器(RF)和电磁导波器。RF发生器可产生一定频率的电磁波,电磁导波器把RF发生器产生的电磁能传送到油层中去。RF发生器的频率范围从0.3到2GHz,功率约30kW,导波器可由铝和铜制成,通过法兰连接后延伸到井下,设计的EMH装置如图4所示。此外,电场技术还可以用于油井增注和原油脱水<sup>[3]</sup>。电增注利用直流电场的电驱动、电化学等效应,改善水的驱油性质,降低油水相之间的表面张力和液体的含水量,使注水效果增强,提高油井产量;电脱水技术主要是为了解决中后期油田原油含水率不断增高的问题。在外加电场作用下,原油乳化液发生极化,产生电偶极子,并且按电场方向重新排列,微小水滴相互融合,并逐渐凝聚成大水滴,由于油水密度的不同,在重力作用下水滴沉降,实现分离。

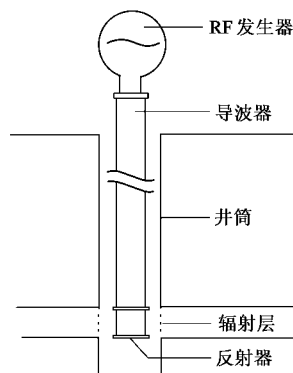


图4 EMH装置图

目前电场技术尚处在理论和室内实验研究阶段,除国外少数的报道外,国内还未见成功的现场试验。这主要是有一些关键的工艺技术和机理问题需要进一步加强研究,包括如何正确地选择井下电极形式和安放位置,以保证产生的电场完全作用于油层,如何选择作用电压和频率,保证加热速度符合生产要求,如何长距离地安全传送电流,同时又要降低能量损耗。因此需要加速相关技术的机理研究,同时开展各种电作业设备的开发研制工作,以保证电场采油技术得到长期持续的发展和广泛的应用。

## 5 振动采油技术

振动采油技术是一个涉及范围较广的概念,任何以机械振动力为作用基础的物理采油技术都可纳入此范畴。从目前的发展状况看,主要包括人工地面振动技术、水力振荡技术以及电脉冲技术三类。人工地面振动技术利用地面大功率可控振源产生的低频波作用于油层,改善地下流体物性及地层渗流条件;水力振荡技术利用井下水力振荡器产生的压力振荡脉冲,作用于油层并解除地层污染;电脉冲技术通过在井下产生高压脉冲波,在近井地层中造成岩层破碎和偏移,形成微裂隙网,增强近井油层的渗透性。人工振动装置由调速电机、变速箱、偏心轮及机架组成,通过控制装置改变振动频率和激振力;水力振荡器由各种流体动力式声波发生器组成,如 Hartmann 哨、簧片哨、旋笛等,利用高速流体运动激发振荡;水力振荡以及电脉冲处理油层的工作示意图见图 5。

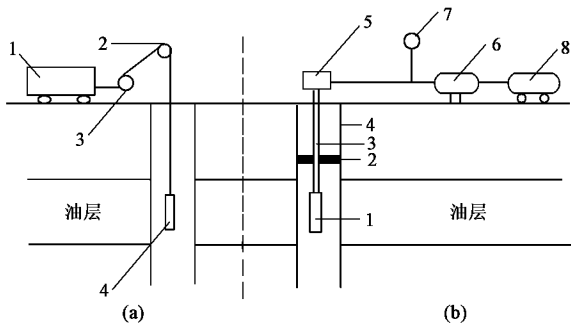


图 5 工作示意图

(a) 电脉冲处理;

(1. 变频器 2. 滑轮 3. 绞车 4. 放电器)

(b) 水力振荡

(1. 振荡器 2. 扶正器 3. 油管 4. 套管 5. 井口 6. 泵车;

7. 流量计 8. 罐车)

振动对油层的作用可以归纳为以下几个方面:

- (1) 振动可使残余油重新聚集,使油层中分散的油滴和存在的残余油聚集成片,变“死”油区为“活”油层,而且聚油速度较快;
- (2) 振动具有改变岩石表面润湿性的作用,可促使岩石表面亲油性减弱和亲水性增强,毛细管阻力降低,减弱原油与岩石表面间的粘滞力,使原油更易于从岩石表面上剥离,加速油体的流动;
- (3) 低频振动的衰减系数小,作用范围广,适合于油井区块作业,具有更强的穿透能力;
- (4) 振动有利于降低原油粘度,改变流动性,并且具有一定的滞后作用时间;
- (5) 振动可使岩层产生微裂隙,或使某些局部较致密的地方变得更为疏松,导致绝对渗透率的提高;
- (6) 振动可使沉积在孔隙表面的污染物剥

离,具有疏通孔隙喉道,清除油层污染的作用。实验证明,通过 Hartmann 发生器产生的水力振动对于解除地层污染的确有效,在室内实验条件下,可使高渗透率岩心的渗透率恢复 126.5%,低渗透率岩心的渗透率恢复 177.1%,相对于污染前的渗透率来说,恢复程度是高渗透率岩心大于低渗透率岩心<sup>[4]</sup>。西安石油学院的金友煌教授利用振动台和起振机作振源,研究了振动作用的影响<sup>[5]</sup>。通过振动作用后,采收率很容易提高 5%—10%。此外,合理的振动还能够降低注入压力,缩短水驱油时间,且有效作用时间可持续一个多月。

振动采油技术目前是一种较为成熟的技术,可广泛应用于采油工业的各个领域,由于其工艺简单,作业成本低,经济效益好,因此得到了广泛的推广与应用。

## 6 超声波处理技术

利用超声波的高强度辐射振动作用、空化作用、热作用、声流作用等,可使流体的物性及流态发生变化,改善井下近井地带的流通条件及渗透性。超声波处理油层系统由地面发生器、传输电缆和井下换能器组成,施工方式与水力振荡技术相似。作业时将换能器用射孔电缆送至井下,地面发生器设备通常安装在作业车上,以方便流动作业,产生的振荡信号经电缆传给井下换能器,由换能器产生超声波,经流体耦合进入油层,实现解堵目的。超声波采油技术是一项发展较为成熟的采油技术,早在 1989 年,长庆石油局与成都换能技术研究所就共同研制出首台超声波样机,这是超声波采油技术发展的一项重大突破。随后在玉门油田用此样机进行了现场试验,经超声波处理后,产量显著增加,油层物性明显好转。随后,玉门、大庆、吉林、辽河、新疆等油田陆续开展了声波采油的现场试验,并取得了良好的效果。可以说,我国对于超声波技术的应用研究,已经迈出了可喜的一步,形成了具有中国工业特色的超声波采油技术。

超声波对油层的作用主要包括三个方面,即机械振动作用、空化作用和热作用<sup>[6]</sup>。机械作用是超声波的作用基础,在振动作用下,介质的振幅、速度及振动加速度均发生显著变化,产生松动、边界摩擦、微裂隙、声流、解聚等作用,降低封堵颗粒与油层微孔隙的凝聚力,破坏附面层;同时,高强度声压的变化还可导致毛细管内外压差的变化,使得毛细管孔径随压差发生周期性的胀大和缩小,胀大时,可使近

井地带的原油进入微孔隙,缩小时,有利于把油挤入井内。空化作用可导致气核崩溃,产生激波。这是因为在油层中不仅蕴藏着原油,同时也存在着大量的油气,这些油气往往以气核形式存在于孔隙中。计算气核在毛管孔道中所受的毛管力可知,大量存在的气核对油体流动具有很大的阻碍作用,空化作用能有效地消除气核,降低气阻,提高近井地带油体流动的速度。热作用是一种综合效应,其一,超声波在传播介质内部的吸收,使得声能转化为热能;其二,在不同介质的分界面处,边界摩擦使油体温度升高;其三,空化作用在气泡崩溃间释放出大量的热能。

目前,超声波技术在采油工程中的应用范围正在不断扩大,主要有超声波防垢、防蜡、增注、乳化、脱水、降粘、冷输等项,并逐渐形成了一门相对独立的采油技术,其不可替代的作用正越来越受到采油技术人员的重视。

## 7 物理技术应用现状分析

物理采油技术是采油工程的重要组成部分,早在20世纪的五六十年代,我国就开始进行超声波技术的研究,但由于种种原因,进展较慢。进入20世纪90年代,各种物理采油技术开始蓬勃发展起来,正逐渐在采油工程中发挥着不可替代的作用。除上述几种主要技术外,目前已产生了一些新的技术,包括高压水射流技术、高能气体压裂技术、非线性采油技术等,而且这些应用技术已经取得了良好的效果。然而,就目前的发展状况来看,物理采油技术还不能替代主力采油技术,究其原因,主要是相应的基础研究还比较滞后,许多问题亟待解决,尤其是关于物理法采油的作用机理以及物理场对油层性质的影响问题,还存在着模糊的认识。现场技术人员从生产的角度出发,更注重应用效果,存在理论研究相对滞后的问题,缺乏较为完整的理论解释体系,可以说,这种研究状态的不平衡阻碍了物理采油技术的发展。在初期现场试验取得成效后,如果在随后的进一步应用推广中出现新的问题,同时又缺乏相应的理论支持,就常常会导致应用推广工作的减缓甚至中止。因

此,需要我们从事物理应用研究的科技人员加强这方面的研究,在理论方面做一些扎实的基础工作,以推动物理法采油技术的发展。

## 8 结束语

我国蕴藏着极其丰富的石油资源,同时也存在着复杂的地质环境,使得大量的石油储备无法得到最好程度的开采,物理法采油技术具有其他常规采油方法无可比拟的优势,具有较好的应用前景,因而越来越受到石油科技工作者的重视。中国石油天然气总公司在对近期我国提高采收率技术发展的建议中指出,应大力加强提高采收率技术的基础研究,探索物理法采油等低成本的提高采收率方法。实事求是地说,目前进行物理采油技术开发的多数是采油专业的科研人员,然而物理采油技术与物理基础研究是息息相关的,它是一门物理专业和采油专业的交叉学科,没有扎实的物理理论研究基础,是无法更好地搞好这项研究工作的。由于篇幅所限,本文只是对物理采油的相关技术进行了简要的介绍,感兴趣的同行可参考相关文献。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 ] 王仲茂. 振动采油技术. 北京:石油工业出版社,2000. 172 [ WANG Z M. Vibration Technique in Oil Production. Beijing: Petroleum Industry Press,2000. 172( in Chinese ) ] ]
- [ 2 ] 胡博仲. 波场采油. 北京:石油工业出版社,1996. 155 [ Hu B Z. Wave-Field Oil Production. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. 155( in Chinese ) ] ]
- [ 3 ] 关继腾. 物理,1997,26 :486 [ Guan J T. Wuli( Physics ),1997, 26 :486( in Chinese ) ] ]
- [ 4 ] 路斌. 石油矿场机械,2001,30( 5 ):30 [ Lu B. Oil Field Equipment,2001,30( 5 ):30( in Chinese ) ] ]
- [ 5 ] 金友煌. 石油钻采工艺,1997,19( 增刊 ):28 [ Jin Y H. Oil Drilling & Production Technology,1997,19( Supplement ):28( in Chinese ) ] ]
- [ 6 ] 路斌. 石油钻采工艺,1992,14( 5 ):51 [ Lu B. Oil Drilling & Production Technology,1992,14( 5 ):51( in Chinese ) ] ]