

油水分离技术现状及发展趋势

吴应湘 许晶禹[†]

中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190

摘 要 随着油田开采时间的增长, 产出液中含水率逐年增加, 部分井液的含水率高达 95% 以上, 给目前已有的处理工艺带来新的挑战. 为了解决这些问题, 急需研发新型的油水分离技术, 以解决传统技术所遇到的瓶颈. 该文结合目前油气开发的新需求, 系统地介绍了油水分离的技术现状, 讨论了含油污水深度处理技术的特点, 分析了未来油水分离技术的发展趋势. 同时, 结合力学研究所研制的新型管道式油水分离技术, 详细介绍了柱型分离、导流片型分离、以及 T 型管分离等新技术, 提出了新型管道式分离技术具有的技术优势, 可解决稠油开采、海底作业、以及井下分离等难题, 指明了技术发展方向.

关键词 油水分离, 含油污水处理, 管道式分离技术

中图分类号: O359 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0992-15-001

收稿日期: 2015-01-05; 录用日期: 2015-04-14; 在线出版日期: 2015-04-21

[†]E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

引用方式: 吴应湘, 许晶禹. 油水分离技术现状及发展趋势. 力学进展, 2015, 45: 201506

Wu Y X, Xu J Y. Current situation and development tendency of oil-water separation technology. *Advances in Mechanics*, 2015, 45: 201506

© 2015《力学进展》版权所有

1 引 言

油井产出液通常都是不同分子质量的烃组分、水以及其他杂质组成的混合液。在常温常压下, 相对分子质量较大的烃组分形成的混合物呈液态, 通常称为原油, 或石油; 而相对分子质量较小的烃组分形成的混合物呈气态, 通常称为天然气。在油藏的高温、高压条件下, 天然气溶解在原油中, 以纯液态形式存在。当这种混合液从井下沿井筒向上流动到达井口, 继而沿集输管线流动时, 随着压力的降低, 溶解在液相中的轻烃组分不断析出, 并随其组成以及当地的压力温度条件, 形成一定比例的油气共存混合物。同时, 按照石油生成的有机成因理论, 石油是由水中的微生物死去后沉积于水域的底部, 进而被沉积的泥砂所掩埋, 并且在地下高温、高压和缺氧条件下分解而生成的。这样, 生油地层一般是古代湖泊或海洋区域的沉积岩, 岩石的孔隙被水充满, 储集了石油后, 油的周围仍为广大的含水区, 石油和外围含水区构成一个范围很大的水动力学系统。正是这种水动力学系统, 为油田的开发提供了主要的驱动力, 这也使油井产出液中含有大量水份成为必然 (当然, 若按无机生成理论, 油周围的含水区域不是必要的, 但目前为止, 无机成因油藏仍属凤毛麟角)。另外, 若属砂岩地质, 石油开采的渗流过程中, 可能会携带出一定量的泥沙 (砂)。这样, 要得到炼油厂使用的原油和用户使用的天然气就必须对油井产出的混合液进行处理, 去除产出液中的含水和其他杂质。将油井产出液处理到炼油厂使用的原油和用户使用的天然气的整个过程都与油水分离有关, 可见, 油水分离是油田生产最重要的工艺流程之一。在油田开采后期, 由于地层压力下降使地层的原油运移性能变差, 为了保证油井的正常生产和提高原油采收率, 往往采用活性水驱油、碱水驱油、聚合物驱油、三元复合驱油、泡沫驱油等技术, 这使产液中不仅含有更高的水份, 而且含有一定的化学药剂, 这些化学药剂会使产液的油水乳化变得更为严重、更加稳定, 且表面活性剂、碱、聚合物溶液等驱替剂在地层中的冲刷、溶蚀、离子交换、裹挟等作用下, 使得油藏中的细微颗粒、黏土等固体颗粒与原油和化学剂絮凝在一起, 形成稳定的悬浮乳化液, 这就进一步增加了油水分离的困难。

从广义上讲, 油水分离过程可分为从油水混合液中提取原油的原油除水过程, 以及从含油污水中 (含油率常低于 1%) 去除油和其他杂质的含油污水处理过程。图 1 给出了从油井产出液到合格原油、天然气、外排水的基本分离流程。从图中可以看到, 油田的油气水分离是一个非常复杂的过程, 且气相和液相产品还与操作的压力、温度条件、各相含率、油品条件等密切相关, 这也在一定意义上增加了油水分离工艺的难度。由于天然气的密度比原油和水小得多, 所以工艺流程上先进行气液分离。气液分离可能从油井产出液进入井眼过程中就开始, 并在流经输运管道和处理准备过程中逐渐得

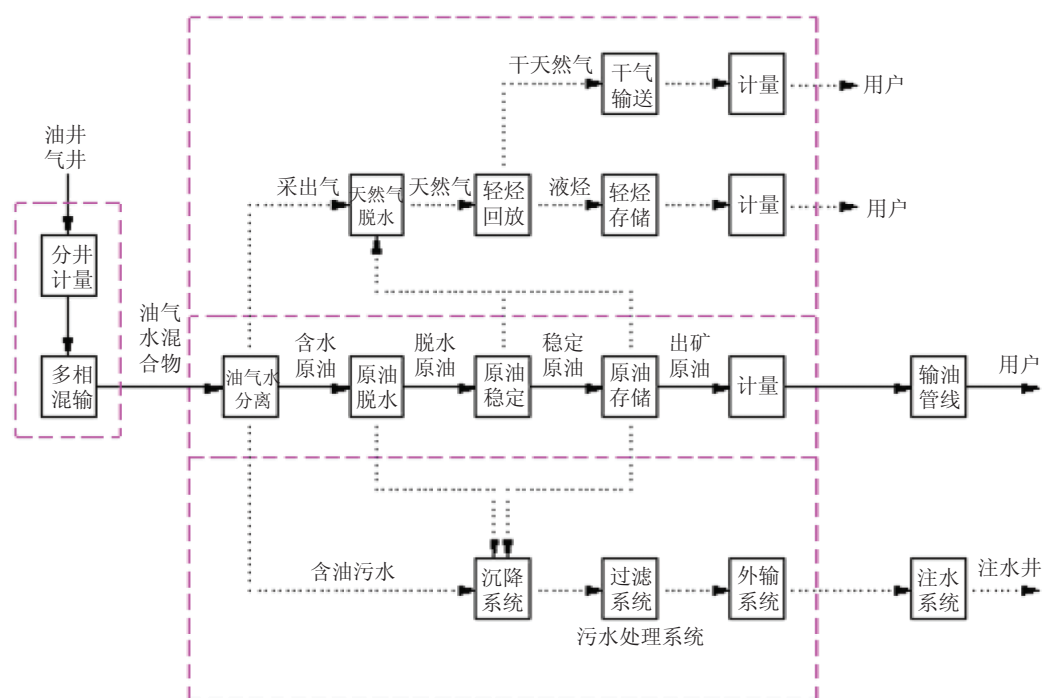


图 1

油井产出液处理工艺流程框图

到加强. 在一定条件下, 流体到达气液分离器之前就已经完成气相和液相的相间分离, 分离器仅起到气液间的脱离作用, 即使气体上升至一个出口, 液体下降至另一个出口, 这样就完成了气液分离. 剩下的油水混合液的分离是油气水分离的重点和难点, 因此该文也将重点讨论油水混合液的分离问题.

在油水混合液中, 当油滴粒径大于 $100\mu\text{m}$ 时, 油将以连续相的形式存在, 形成油块或油层, 称为浮油; 油滴粒径介于 $10\sim 100\mu\text{m}$ 时, 以微小的油滴悬浮于水中, 称为分散油; 当油滴粒径在 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 范围 (多数情况下粒径介于 $0.1\sim 2\mu\text{m}$ 之间), 称为乳化油; 而当油滴粒径小于 $0.1\mu\text{m}$, 以分子形式呈均匀状态存在时则为溶解油. 可见, 浮油、分散油、乳化油和溶解油 4 种形态可由油滴粒径的大小判断. 通常, 当含水率在 30% 以内时, 油相主要以连续相形式存在, 形成“油包水”型乳化液; 当含水率在 30%~70% 范围, 混合液中可能同时存在油包水和水包油两种乳化液, 形成复杂的乳化现象; 含水率超过 70% 后, 水相将成为连续相, 从而会形成“水包油”型乳化液; 且随着含水量的增加, 混合液中将出现没被乳化的“游离水”, 含水量越高, 游离水的含量也越高. 因此, 油水分离过程有时可以根据油水的含率变化而采用不同的方法. 而且, 不管是油包水型还是水包油型的乳化液, 在油水分离过程中, 油水间的破乳总是必要

的,且需要根据油相的存在状态和其粒径大小,选择不同的处理方法或者几种方法的综合使用才能进行有效的分离.只是油包水和水包油状态在物理本质上有根本区别,所以在分离方法上也显示出不同的特色.

油水混合液的分离方法可归纳为 4 大类:物理方法、化学方法、物理化学方法和生物化学方法.物理方法是利用各相密度、导电率、声速等物理性质的差异而实施的分离方法,主要有重力沉降、离心旋流、高压静电、高频脉冲、微波辐射、超声波等方法.化学方法是在油水混合液中加入适量的化学药剂(破乳剂、聚并剂等)破坏油水乳化液的界面稳定性,将油水间的乳化状态转变为游离状态,进而实现油水混合液的分相分离.物理化学方法是将物理分离方法与化学分离方法结合使用,达到油水分离的目的.生物化学方法是利用微生物胞体组成的生物破乳剂破坏油水乳化液的稳定状态,实现油水混合液的脱水.每种脱水方法都有各自的特点和适用条件.因此,选用原油脱水方法时要综合考虑原油性质、含水率、油水乳化性质和程度、乳状液分散度和稳定性等因素.

在油水分离工艺流程中,还存在一个很重要的含油污水处理问题.因为油水混合液中的悬浮物、溶解油、以及部分破乳不彻底的乳化油等,将存在于原油脱出的水中形成低含油污水.这些含油污水不能直接排放或回注,而必须进一步处理到可以排放或回注的标准,以便减少对地层和环境的污染.油田的含油污水可根据处理的深度不同而分为初级治理、二级治理和三级治理.初级治理属于预处理,用来去除浮油和固体悬浮物,主要采用物理方法和物理化学方法,包括重力沉降法、离心法、粗粒化法、浮选法、过滤法、膜分离法、絮凝沉降法等.二级治理用来去除污水中含有的大量有机污染物,主要采用生物化学方法,包括活性污泥法、曝气法、生物过滤法、生物转盘法等.三级治理也叫深度处理,多采用化学法和物理法,包括离子交换、电渗析、超滤、反渗透、活性炭吸附、臭氧法等.经三级处理后,通常治理效果都比较好,处理后的水可重复利用,但费用很高.

2 油水分离技术现状

沉降分离是油水分离最基础的过程,沉降分离的前提假设为原油与水互不相溶,密度不同,溶液为非乳化液或者非稳态乳化,油相为分散相,油滴在罐体里最终的沉降速度为

$$V = \sqrt{\frac{4(\rho_w - \rho_o)gd}{3\rho_o\xi}} \quad (1)$$

式中, V 为分散相沉降速度, m/s ; d 为油滴直径, m ; ρ_w 为水相密度, kg/m^3 ; ρ_o 为油相密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ξ 为无量纲阻力系数. ξ 的数值取决于油滴的状态和与油滴尺寸大小有关的雷诺数.

在斯托克斯定律适用范围内 ($Re < 0.3$), 阻力系数满足的关系为

$$\xi = 24/Re \quad (2)$$

这时, 油滴在罐体里最终的沉降速度为

$$V = \frac{(\rho_w - \rho_o)gd^2}{18\mu_w} \quad (3)$$

在牛顿定律范围内 ($1000 < Re < 200000$), 阻力系数接近常数, $\xi \approx 0.44$, 这时, 油滴在罐体里最终的沉降速度为

$$V = 1.74\sqrt{\frac{(\rho_w - \rho_o)gd}{\rho_o}} \quad (4)$$

若雷诺数在斯托克斯定律和牛顿定律之间 ($0.3 < Re < 1000$), 阻力系数的表达式为

$$\xi = 18.5/Re^{0.6} \quad (5)$$

从油滴沉降速度公式 (3) 和公式 (4) 可以看出, 增大分散相的粒径、增大两相的密度差、减小连续相黏度 (提高雷诺数) 等都有利于油水分离. 虽然这些公式没有考虑乳化液稳定性和分散相液滴聚并后液滴变大的影响, 但是它们描述了油水分离过程的基本规律, 所以目前多数分离方法都是基于该原理发展起来的. 利用油水两相的密度差进行重力沉降的分离方法, 由于其低能耗、低初成本和运行使用简便被视为油水两相分离的首要考虑原则. 但是, 当油水分离设备的占用空间尺寸受到限制, 或油水两相密度差很小时, 重力沉降就不再是有效的分离方法, 例如在海洋平台等场合, 分离器的尺寸和重量会受到严格的限制, 提高分离效率就成为最重要的考虑因素.

从液滴沉降最终速度公式 (3) 和公式 (4) 描述的重力场中液滴的沉降规律我们看到, 如果使液滴受离心力作用, 则液滴承受的加速度为

$$a = r\omega^2 \quad (6)$$

式中, r 为旋转半径, ω 为旋转角速度. 用 a 代替公式 (3) 和公式 (4) 中的 g , 就得到离心力场中液滴的分离加速度.

$$\frac{a_c}{a_g} = \frac{r\omega^2}{g} = G^+ \quad (7)$$

a_c 和 a_g 分别是在离心加速度和重力加速度作用下液滴的分离加速度. G^+ 是著名的离心系数. 典型的商业离心机的离心系数高达 $5000 \sim 15000$, 可见离心沉降的效率会远远高于重力沉降, 这也是近年来采用离心沉降分离逐渐取代重力沉降分离的根本原因.

2.1 油包水型分离方法

油包水型原油的含水率一般低于 30%, 美国在 20 世纪初对这种原油乳状液发明了电脱处理法, 处理后的含水率可低于 0.5%, 并率先实现了电脱法的工业应用. 随着三次采油技术的应用及稠油油藏的开采等, 乳状液性质变得更为复杂、稳定性增强, 脱水的难度不断加大. 经过几十年的研究和实践, 根据各油田特点, 国内外逐步研究发展了“油包水”型原油脱水的其他方法, 如超声波、加热、微波、旋流、电脉冲、化学、磁处理等各种类型的脱水方法. 下面简要介绍各方法的基本原理、研究现状及发展趋势.

2.1.1 化学法

化学法是指向原油乳状液中添加破乳剂进行脱水, 破乳剂分子驱替油水界面上的天然乳化剂分子, 从而改变油水界面性质或者膜强度, 使之变得不稳定, 然后油水界面被破坏, 处于接触膜内的分散相随之释放, 实现破乳, 是近年来应用较广的一种破乳方法. 破乳剂的使用有近百年的历史, 目前品种近 3000 种, 按照相对分子质量的大小可分为低分子破乳剂 (分子量小于 1000)、高分子破乳剂 (分子量在 1000~10000 之间) 和超高相子质量破乳剂 (分子量大于 10000). 国外对破乳剂的研究较早, 1914 年 Barnickel (1914) 发表了用 0.1% 的硫酸亚铁溶液在 35°C ~ 60°C 下对原油乳状液 (油包水型) 破乳的报道. 我国研制和使用化学破乳剂较晚, 1967 年, 济南化学所开始了化学破乳剂的合成研究, 首次大幅度降低了原油脱出水的含油率 (王学会等 2002).

破乳剂在 20 世纪的发展上, 经历了从用量 1g/L 减小到 10~30mg/L 的变化, 分子量也从小增大到目前甚至上百万的量级. 到目前为止, 在破乳剂研究方法上, 摆脱了过去的尝试法, 逐步走上了可以理论设计破乳剂分子结构的路线, 如改头、换尾、加骨、调重、复配等, 研究目标以特殊表面活性剂和高分子破乳剂为重点 (佟曼丽 2000). 通常来说, 破乳剂分为油包水型和水包油型原油破乳剂. 过去对油包水型破乳剂研究较多, 以非离子型聚醚为主, 分为聚氧丙烯聚氧乙烯醚、聚脂类、磺酸盐及其醚磺酸盐、环烷酸钠及高碳烷基咪唑啉等. 近年来, 随着聚合物驱油等油田产出液由油包水型向水包油型转变, 破乳剂的研制也从油包水型破乳剂转为水包油型原油破乳剂, 这类破乳剂的研究有天然盐水、聚氧乙烯醚破乳剂、磺酸盐、季铵聚合物等. 随着三次采油的进行, 水包油型原油乳状液中往往含有高分子聚合物和表面活性剂, 使得破乳剂的研究朝着复配方向发展, 如氯化钙加氧化剂 (或还原剂) 破乳、盐水加多元醇加季铵盐破乳等. 伴随着我国稠油破乳脱水难题制约稠油的开发问题, 稠油乳状液的破乳将成为破乳剂的研究热点.

2.1.2 加热法

对于油包水型乳化液, 采用自然沉降分离法虽然能够有效脱出原油中大部分的游离水, 但是耗时长、效率低、不能连续工作, 且对黏度大、油水密度差异小、含水率低的原油脱水处理基本上无法达到要求. 因原油的热容较小, 较少的能量就能升温至所需值, 故通常采用加热法降低“油包水”型原油黏度、油水界面张力来提高沉降脱水效率. 这种加热沉降可做成先加热再进入罐体内沉降, 或者集加热器与沉降器于一体做成加热沉降装置 (常用于大型油田的油气集输站) (陈晓东等 2014), 加热沉降装置通常体积庞大, 能将原油温度从 65°C 提高到 110°C , 含水率从 20% 降到 10% (袁洪涛 2004).

在加热沉降法基础上, 为了使原油脱水达标, 常联合化学药剂协同脱水, 这种方法被称作热化学法. 即先向乳化液中添加经过筛选的破乳剂, 然后利用泵或者管路的流动搅拌, 使化学药剂到达油水界面膜上, 降低界面膜的表面张力破乳, 然后水滴碰撞聚并最终依靠重力沉降. 热化学脱水法工艺简单, 操作方便, 目前在油田上应用较多. 但是与电脱法 + 化学药剂法相比, 存在生产成本高, 性能不稳定, 工艺流程不易密闭等缺点.

2.1.3 电脱法

电脱法是考虑到水是一种极性电解质, 在电场的作用下会被极化, 极化后的水滴在电场引力的作用下移动, 发生碰撞聚并, 粒径增大, 最终克服运动阻力沉降从而实现分离的目的. 电场引力 F 可如下公式表示

$$F = \frac{6Kr^2E^2}{l^4} \quad (8)$$

式中, K 为原油乳化液的介电常数; E 为电场强度; l 为水滴的中心距.

水滴运动阻力 f 的计算公式为

$$f = C_D \frac{\rho_f |u - v|^2}{2} A_p \quad (9)$$

式中, C_D 为阻力系数; ρ_f 为连续相黏度; $|u - v|$ 为水滴与周围流场的相对速度; A_p 为水滴的有效横截面积. 当 $F \geq f$, 水滴会相向移动; 反之, 若电场强度弱、油滴粒径小、原油乳化液黏度大, 即 $F < f$, 油滴将不会运动. 水滴相向运动并以一定的速度碰撞, 如果动能足以破坏水滴表面的界面膜, 两者便会聚并形成大水滴, 粒径得到增大. 电脱水器是目前低含水原油脱水使用最普遍的设备, 为原油脱水的最后一道工序, 通常要求原油含水率低于 30%, 目前广泛应用在各种炼油厂和油田中.

根据电脱水的结构设计供电方式的不同, 可大致分为 4 种: 常规交流电脱分离器、常规交直流电脱水器、鼠笼式平流电脱水器、以及高速原油电脱分离器 (吉庆林

等 2013)。目前,为了扩容需求,电脱技术在进入 21 世纪以后出现了新的发展方向,即多种技术联合使用,如紧凑型静电预聚结器+离心分离或者重力沉降等,在紧凑型静电预聚结器中,水滴从乳化态的小颗粒状态变化为聚并后的大颗粒,这样能提高后续离心分离或者重力沉降的效率(Hana et al. 2005, Taggart et al. 2008)。电脱水器的发展围绕着增大处理范围进行,发展绝缘电极以增大含水率处理范围及降低电耗;加强研究高频脉冲电脱水装置以期解决复合驱产出液的脱水难题;将离心分离、微波、超声波等技术与电脱技术相结合以期达到联合破乳减少破乳剂用量,优化供电频率和电压以减少电站负载等成为目前的迫切需求(John et al. 2002)。

2.1.4 超声波法

超声波法分离油包水型原油乳化液主要依靠超声波是弹性机械波,具有机械振动和热作用功能,在使原油介质和水滴一起振动的过程中,水滴相互碰撞、粘合,粒径增大。同时,振动降低了油水界面膜的强度,有利于破乳(谭晓飞 2007)。此外,超声波的热作用也可降低原油黏度。相对于其他方法,超声波法能降低破乳温度,减少加热设备和能耗(Guo-kun 2005, Ye et al. 2010)。

超声波法原油破乳脱水方法的影响因素较多,如声强、超声波频率、辐射时间、温度、沉降时间、原油黏度等。国外在 20 世纪 80 年代对超声波法就有研究。辛格(Singh 1995)对油包水型原油乳状液进行超声波法与热沉降法进行了对比研究,发现常温下超声波作用 80 分钟后,最大脱水率为 75.3%,而用热沉降恒温在 80°C 以内两个小时后,最大脱水率不超过 50%,说明超声波法分离油包水型原油乳状液比热沉降方法要好。此外,超声波法能够强化原油破乳脱水(Com et al. 2001),美国泰克科技公司开发的超声波原油脱水处理装置在 1980 年代进行了工业试验,取得了良好的效果(Davis et al. 1995)。国内方面,孙宝江(1999)、杨伟(2014)、叶国祥(2009)等的研究表明,超声波法相对于自然沉降能降低含水率,尤其是与化学破乳剂协同使用时,能降低破乳温度,减少化学破乳剂用量,具有良好的应用前景,但超声波的破乳机理还有待进一步深入,目前还缺乏大范围的工业化设备。

2.1.5 微波辐射法

微波是频率约在 300 MHz~300 GHz 的电磁波,能产生高频(每秒数亿次)交变电场,极性分子在电磁场作用下产生偶极转向极化,这种偶极转向极化与交变电场不同步使内能转变为热能,体系温度迅速升高,最终微波能转化为热能。所以微波辐射法实质上还是一种间接的加热法,但与传统的加热法相比,具有速度快、均匀、没有温度梯度和滞后效应等优点(李秦 2011)。

由于乳化液里水滴中溶解油酸碱盐离子具有极性,极性分子在电磁场作用下振动

旋转, 加上微波热效应黏度降低, 最终导致水滴界面膜强度减弱或破裂聚并沉降, 从而达到脱水的目的. 国内对于这种方法的研究主要是针对稠油脱水, 毛燎原 (2006) 等的研究表明, 虽然微波辐射脱水法具有很多优点, 但是微波辐射稠油脱水率低 (最大 70%), 辐射时间以及分离时间长、所需压力高等缺陷, 部分学者甚至采用加盐协助稠油微波辐射脱水研究, 并取得了一些成果 (赵杉林等 2007, 李秦等 2010). 目前, 该方法在部分国家已经投入工业应用.

2.1.6 磁处理法

磁处理法主要利用磁场对分子间色散力的作用, 因为原油中蜡晶分子是非极性分子, 在外加磁场下, 蜡晶分子瞬时偶极矩能够精准的同相位, 从而分子间色散作用较强, 蜡晶聚结, 并释放出吸附的液态烃馏分油, 使原油中石蜡颗粒减少, 液态烃馏分增加, 原油黏度下降, 从而有利于原油破乳 (朱林等 1994, Tao et al. 2006).

磁处理技术在 20 世纪 80 年代应用在原油的防蜡、降黏、输油防垢等领域 (宋金璞等 2001), 在油水分离领域的应用还在起步阶段. 研究发现, 在磁通密度为 0.10T 时, 原油的脱水率为 11.7%, 废水中含油率可下降 91%, 显示磁处理法在低含水原油脱水方面一般可作为辅助手段进行脱水, 其在污水处理方面更有发展前景 (张红等 2000).

2.1.7 生物法

生物法是利用微生物消耗表面活性剂, 从而破坏油水界面膜或者是培养某种分泌具有表面活性剂的生物来进行破乳脱水. 1983 年, 国外有报道称污泥诺卡氏杆菌、何氏汉逊酵母的产物麟酰甘露聚糖及其他多糖均对油包水型乳化液具有破乳能力 (孙中雪 2013). 国内对生物法的研究起步较晚, 直到 20 世纪 90 年代才有相关文献 (徐远春等 1998, 冯志强等 2004).

近年来, 随着注聚采油和三次采油等的进行, 产出液乳化严重, 含有大量的乳化石油污染物, 给污水处理增加了很大的困难, 而生物法具有使用量低、脱水快、脱水效率高、可降解性、对环境无害等优点, 在原油脱水、污水处理有着广泛的应用前景. 但是, 目前对生物法的研究还不成熟, 使用费用高, 进一步的研究重点可能是高效、适应性强、廉价的生物破乳剂 (Nadarajah et al. 2002).

2.1.8 其他方法

对于油包水型原油脱水的其他方法如过滤法、旋流法、磁处理法等研究的较少, 旋流油水分离法的设备主要是旋流器, 旋流器分为静态和动态两种, 静态旋流分离器分离低含水原油因压降大、运行费用高, 至今尚未在此领域获得实际应用, 动态旋流器原油脱水技术仍处在研究阶段 (Gay et al. 1987); 过滤法利用固体吸附剂作为过滤材料, 使油包水型乳化原油流过装有过滤材料的过滤柱, 因固体吸附剂的选择吸附性

使水滴被吸附从而净化原油, 这种分离方法因压降大、处理量小、反冲洗过程容易污染环境, 基本上在低含水原油脱水上没有大规模的应用, 相关方面的研究也较少 (杜荣熙 1999).

2.2 水包油型分离方法

水包油型乳化液一般是指含水率高于 70%. 分离的方法主要包括重力沉降法、化学法、离心分离法、重力惯性法、稀油掺混法, 以及不同方法的复合应用等.

2.2.1 重力沉降法

重力沉降法主要是指依靠多相介质间所受的重力不同, 而实现多相分离过程的方法. 其主要工作部件是重力式分离器, 当多相介质进入分离器后, 由于密度不同因此产生重力差, 进而使密度较重相在重力作用下发生沉降, 因而从密度较轻相中析出, 从而完成多相分离任务. 在油田上常见的重力式分离器主要包括: 卧式 (或立式) 除油罐、斜板隔油池、粗粒化 (聚结) 除油罐等.

图 2 是典型的卧式三相分离器示意图, 它的工作原理为: 混合液体由入口管进入分离器罐体后, 流体的流向、流速突然发生改变, 使气液得以初级分离. 在重力作用下液相流体流入分离器的集液室, 气相则在集液室上部运动. 在罐体内停留足够的时间后, 气相中夹带的较大液滴在重力作用下直接下沉进入集液室, 其他少量雾状液滴经除雾器聚并成较大液滴后流入集液室; 同时, 集液室内的混合液体中残留的少量气体上升至液面并进入气相, 油水两相在重力作用下得到了分层, 水相沉入分离器的底部并从排水口流出, 油相经由液面控制器控制的油阀流出分离器, 从而达到了三相分离的目的. 由颗粒的沉降运动可知, 分离效率与混合液体在罐内的停留时间密切相关, 而停留时间又取决于罐体体积和液体的流动速度, 故在油田上为了提高分离效率, 卧式分离器的体积一般都较大.

1904 年, 哈森 (Hazen) 根据实践经验提出了“浅池理论”, 即在重力沉降过程中, 分散相液滴的沉降效果是以颗粒的运动速度与池子面积为函数来衡量的, 与池深、沉降时间无关, 因此提高隔油池的处理能力有两个途径: 扩大沉降面积、提高沉降速度 (李国珍等 2001). 在此基础上发展起来的隔油池有平板式隔油池和斜板式隔油池, 而平板式隔油池具有截留的油滴粒径大、处理效率低、占地面积大等缺点. 斜板式隔油池是在隔油池内倾斜布置平行板组或波纹板组, 除油效果得到了显著改善. 常见的斜板式分离装置有多层平行板型分离器、倾斜波纹平行板型分离器和多层倾斜双波纹峰谷对置型分离器等.

图 3 为波纹斜板式隔油池, 其主要构件为多层波纹形板所构成的斜置波纹板组. 高含水的混合液在板与板间的平行流道中流动, 在浮力作用下油滴上浮, 在板下聚集

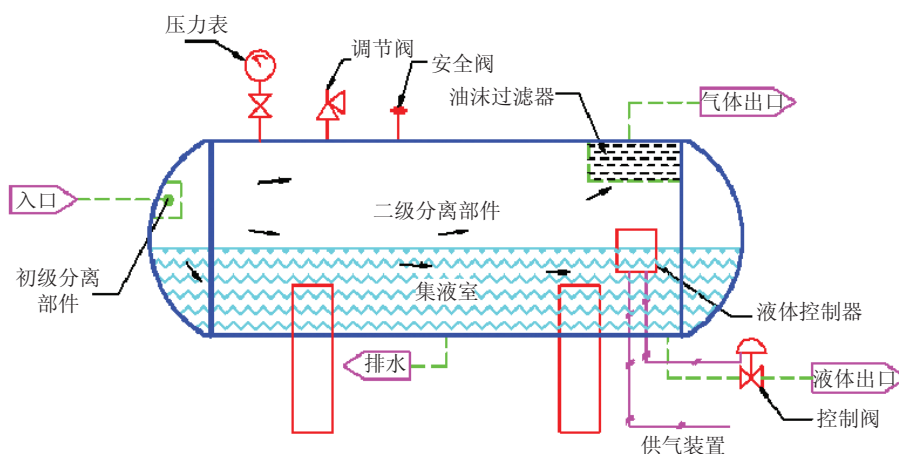


图 2

卧式三相分离器

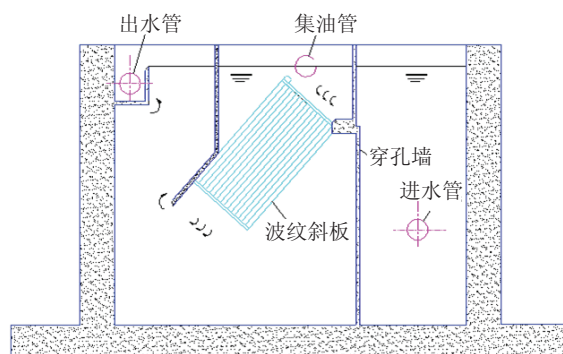


图 3

倾斜波纹平行板式隔油池

并沿斜板移动, 细小油滴可聚并成大油滴而加速分离. 这种斜板式隔油池可将粒径为 $60\mu\text{m}$ 的油滴分离出去, 但由于隔油池的原理仍是基于密度差异, 油的去除效率仅能达到 70%~80% 左右.

2.2.2 离心分离法

离心分离法的主要机理是运用离心力代替重力, 实现两相或多相的分离任务. 而按照发生离心力的方式不同, 又可分为水力旋流技术和螺旋管技术等. 其中水力旋流技术, 是通过流动或机械引起的转动而将离心力赋予不相溶的两种介质而使其分离的一种技术. 其主要分离设备依赖于水力旋流器, 而离心力是使颗粒产生沉降的主要动

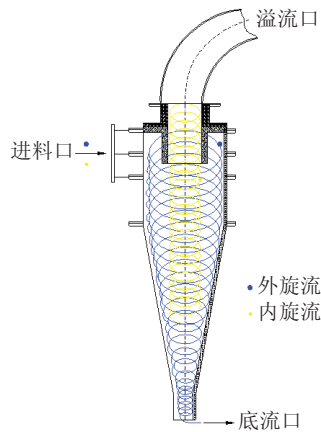


图 4

液-液水力旋流器

力, 其大小为

$$F = (\rho_1 - \rho_2)Vr\omega^2 \quad (10)$$

式中的离心加速度 $r\omega^2$ 代替了重力沉降中的重力加速度 g 来描述颗粒的沉降特性. 应当注意, 离心加速度是沿半径 r 方向作用的, 而且是 r 的函数. 通常, 油水的离心分离需要在旋流器内进行. 在旋流器内, 流体的运动是复杂的三维旋转运动, 流体的这种旋转运动也称为旋涡运动. 旋流器内流体混合液的分离过程, 就是流体旋涡产生、发展和消散的过程.

国际上利用水力旋流器进行油水分离兴起于 20 世纪的 80 年代, 而国内油田于 20 世纪 90 年代初开始引进水力旋流器并用于油水分离 (Colman et al. 1980, 刘贵喜 1997). 由于离心分离可大大提高颗粒沉降速度, 对于两相密度差较小和分散颗粒直径较小的混合液, 均有较好的分离效果. 图 4 为液-液水力旋流器结构示意图, 主要由旋流器入口、柱段、锥段、底流口和溢流口组成. 水力旋流器分离原理及过程为: 待分离油水混合液通过切向入口进入旋流器体, 形成高速旋转流场, 利用油水之间的密度差异, 重质相水被甩向边壁, 螺旋向下运动并从底流口流出, 而轻质相油则在旋流器中心附近形成油核, 从上部的溢流口流出, 从而达到油水分离的目的. 水力旋流器具有体积小、重量轻、分离效率高、无运动部件、易于维护等优点, 是近年来陆上和海上油田重点推广应用的油水分离设备, 但水力旋流器也存在对几何结构参数敏感, 如果参数设计不当, 旋流器内强旋流场容易使油滴破碎乳化而恶化分离过程. 同时, 水力旋流器对来液流量和性质要求相对稳定、通用性差、自控水平要求高等缺点.

另外一种螺旋管分离技术可追溯于人们最初对于高效换热的需求. 但随着对其

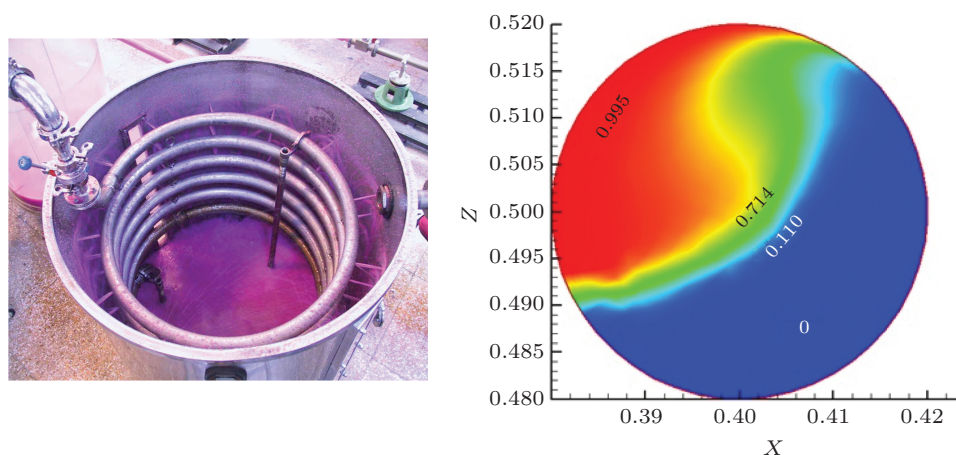


图 5

螺旋管结构及相分布示意图

深入研究,发现螺旋管中油水由于密度差的原因,在旋转流动过程中具有相分布不均等特点(李广军等 2000),因此可将螺旋管用来进行高含水的油水分离(周永等 2004, Li et al. 2012).基本原理是油水混合液在螺旋管流动过程中受离心力作用使密度较大的水相移向螺旋管的外侧,密度较小的油相移向螺旋管的内侧,流动状态稳定后,在螺旋管外侧壁面开凿小孔将水相放出,进而达到油水分离的目的(如图 5 所示).螺旋管型分离器具有占地面积小、处理速度快、分离效率高等优势,但是螺旋管道分离器具有压降大、处理量低等缺点阻碍了其大范围的工业化应用(龚道童等 2006, 贺会群等 2005).

3 含油污水深度处理技术

含油污水一般是伴随着原油脱水而产生的,原油脱出的游离水通常含油低于 5 g/L,这种含油污水若不经处理直接回注地层,则其中的油珠会堵塞油层毛细通道,降低油层渗透率.此外,如果不经处理直接排放到江河湖海等,将严重影响周围生态环境.污水深度处理的方法主要包括:过滤法、离心分离法、气浮法、化学法、生化法、超声波分离法、吸附法、粗粒化法、膜分离等.

3.1 过滤法

过滤法处理含油污水在工业上已有应用,如采用核桃过滤器(黄廷林等 2003, 李相远等 2005)、石英砂过滤器、双层滤料过滤器(李雪辉 2002)、多层滤料过滤器、双向过滤器(任彦中 1995)等.过滤法一般作为含油污水处理的最后一级,是国内外油田普

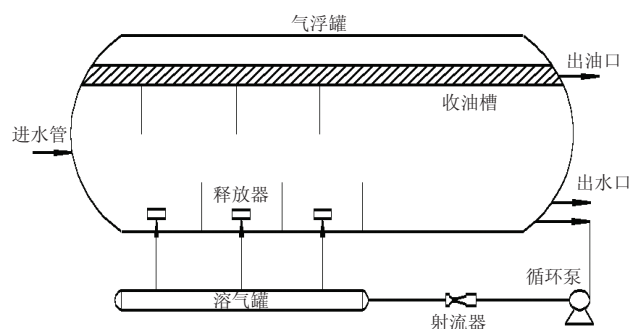


图 6

卧式喷射式气浮机结构及工艺流程示意图

遍采用的一项技术. 过滤法除油效果虽好, 但是对进水水质的酸碱度、温度、石油类的浓度及过滤速率等要求较为严格, 且操作复杂, 设备投资大. 过滤法与生物膜处理结合可降低运行费用, 并对高浓度有机废水处理有令人满意的效果, 是过滤法的新发展 (丁九亮 2001).

3.2 气浮选法

气浮选除油法是采用不同的装置向污水中溶入一定量的气体, 产生大量微小气泡, 利用吸附作用使气泡与污水中的细小油粒和悬浮物相结合而形成絮状物, 在浮力作用下絮状物很快浮出水面, 达到分离目的. 图 6 为一种卧式喷射式气浮机, 工作原理为: 气浮罐的部分出水经循环泵加压后送入射流器, 与射流器吸入的气体形成气水混合物进入溶气罐, 在溶气罐中气体被充分溶于水中, 然后经释放器进入气浮罐, 由于气水混物流道突然扩张, 压力减至常压, 之前溶于水中的过饱和气体便以微小气泡形式释放, 与污水中的细小油粒和悬浮物相结合而上浮到水面, 形成油气泡沫进入收油槽. 该气浮机的主要结构特点是溶气工艺由气浮罐外的溶气罐完成, 溶气罐与射流器相连接.

气浮选法根据气泡产生方式的不同, 分为溶气气浮法、布气气浮法和电气浮法等. 气浮效果受两个因素的影响较大, 一是产生的气泡的质量; 二是浮选剂, 如絮凝剂、发泡剂等可以大大提高气浮法的效率. 气浮装置根据气泡的产生方式, 已经历了三代的发展, 一代为溶气气浮, 主要用于 21 世纪实际以前的含油污水处理中, 具有运行费用高, 流程复杂 (彭忠勋 1994). 到了 21 世纪, 被作为二代的叶轮气浮所取代, 叶轮气浮利用叶轮高速旋转时在水中形成的负压区所吸入的空气被切割成直径 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 的气泡. 近年来, 离心气浮处理技术开始发展. 目前, 国内外开展了很多关于紧凑型气浮旋流设备, 如充气水力旋流器的气浮旋流组合 (Colic et al. 2008)、气浮与常规水力旋

流器单体组合 (Oswaldode et al. 2006)、气浮与低强度旋流离心相结合 (马力强等 2009) 等。紧凑型气浮旋流装置有效的利用了气浮与低强度旋流离心场的协同作用, 使气泡与油滴的碰撞聚并几率增加, 停留时间大大减少, 分离效率大大增加, 这种装置还具有占地面积小、处理能力大、分离效率高、适应力强的优点。

对紧凑型气浮旋流设备的研究从 20 世纪开始, 目前已经有很多国际公司生产类似的设备, 如美国捷高科技公司、德国西门子公司、以及法国威立雅水务技术公司等。与国外的气浮旋流装置相比, 我国研发工作起步较晚。近年来, 力学研究所与中海油深圳分公司合作提出了一种新型的管道式动态气浮选装置, 该装置采用微孔纳米膜生成微气泡的手段, 并与 T 型管道分离技术相结合, 使气泡与含油污水充分接触, 通过中海油南海流花油田的现场中试实验, 连续测试结果表明分离后的生产污水小于 20 mg/L (邓晓辉等 2011, 吴应湘等 2013)。

3.3 絮凝法

絮凝法也是化学方法, 主要利用破乳 + 絮凝作用, 将污水中的悬浮油滴、固体颗粒聚集, 降低污水的含油率。该方法通常作为污水处理中的辅助手段, 常配合气浮、旋流、重力沉降、生物法使用, 具有工艺简捷、处理效果好的优点, 但同时存在药剂的筛选问题, 并且投放量大、价格昂贵, 若筛选不当会造成后续处理困难, 从而影响了其在工业上的推广使用。

3.4 吸附法

吸附法利用亲油材料, 吸附废水中的溶解油及其他溶解性有机物。最常用的吸油材料是活性炭, 可吸附废水中的分散油、乳化油和溶解油。由于活性炭的吸附容量有限 (对油为 30~80 mg/L), 一般只用作含油废水多级处理的最后一级处理, 出水含油质量浓度可降至 0.1~0.2 mg/L。由于该方法成本高, 再生困难等缺点使其在使用上受到一定的限制, 大规模的应用于石油工业含油污水中还具有难度。

3.5 粗粒化法

粗粒化技术是分离含油废水的一种物理化学方法, 粗粒化处理的对象主要是水中的分散油和非表面活性剂稳定的乳化油。粗粒化法又称聚结法, 是粗粒化及相应的沉降过程的总称。该法是利用油、水两相对聚结材料亲和力相差悬殊的特性, 油粒被材料捕获而滞留于材料表面和空隙内形成油膜, 油膜增大到一定厚度时, 在水力和浮力等作用下油膜脱落合并聚结成较大的油粒。聚结后粒径较大的油珠则易于从水中被分离。经过粗粒化的废水, 其含油量及油污性质并无变化, 只是更容易用重力分离法将油除去 (夏楠 2012)。

粗粒化的材料有天然矿石、人工有机材料两类, 如用聚乙烯、聚苯乙烯发泡体或

聚丙烯、聚酰胺作粗粒化等, 还有人造水包皮纤维 (Eric et al. 1987)、改性聚丙烯纤维、聚氯乙烯 (顾大明等 2005) 等. 在现有的处理技术中, 只有粗粒化法可以大幅度提高物理法的除油效果, 但由于粗粒化材料的种类较少, 聚结效率不高, 导致粗粒化聚结工艺的除油效果较差. 到目前为止, 粗粒化聚结除油的机理仍处于探讨阶段, 未形成统一的理论. 因此, 完善聚结除油机理, 开发新型粗粒化材料, 改善粗粒化工艺条件, 进而提高聚结除油效率可能是解决聚合物驱采废水处理的有效办法.

3.6 膜分离法

膜分离技术是指在分子水平上不同粒径分子的混合物在通过半透膜时, 实现选择性分离的技术, 半透膜又称分离膜或滤膜, 膜壁布满小孔, 根据孔径大小可以分为: 微滤膜、超滤膜、纳滤膜、反渗透膜等, 膜分离都采用错流过滤方式. 目前, 微滤膜和超滤膜在油田含油污水处理中均有相关报道, 它与传统过滤的不同在于膜可以在分子范围内进行分离, 并且这过程是一种物理过程, 不需发生相的变化和添加助剂. 但因含油污水成分复杂, 影响因素很多, 加上理论的不足, 使得膜分离技术在石油工业中还没有大规模工业应用. 但是, 膜分离法可能是解决我国低渗透油田污水回用的重要途径之一, 如果能够解决膜通量较低且衰减较快, 处理量小等缺点, 然后研制高通量、抗污染的新型膜, 将会有很好的工业应用前景.

4 油水分离技术的新需求及发展

从 20 世纪 90 年代开始, 我国大部分油田开采进入中后期, 产出液中含水率逐年增加, 部分井液的含水率已达到 95% 以上, 给目前已有的产出液处理工艺带来新的挑战. 为了节约成本, 提高效率, 降低对已有产出液处理工艺的压力, 经常需要进行油水预分离, 即把原油含水率尽量降低到能进电脱罐、污水含油率降到几千毫克每升以便进行污水处理. 因此, 国内外研究者开始寻求级数少、重量轻、占用空间小的油气水高效处理方法, 以便实现海上油气、特别是深海油气的经济开采.

针对油水分离技术的新需求, 国内的工作主要集中于重力沉降罐、多杯等流型油水分离器以及水力旋流分离器等. 例如, 东北石油大学的董雯婷 (2013)、天津大学的张李 (2005) 等通过研究油水分离器内部挡板、入口结构等来优化内部流场以提高沉降效率; 天津大学肖红 (2007) 和马少华 (2013)、中国石油大学的陈文征 (2008) 等采用具有聚结作用的板、聚结材料等辅助油滴聚结以提高油水重力沉降效率. 多杯等流型油水分离器研究的机构主要有东北石油大学 (刘保君 2013)、大庆石油学院 (林浩然 2010), 这种分离器主要基于重力分离原理, 利用多个竖直累加的杯状分离空间将油水混合液分离, 分离后的水通过贯穿杯底的柱状通道回注地层进行油水预分. 水力旋流分离器的研究主要用于污水处理, 如西南石油学院的杜红勇 (2005)、中国石油大学的

张瑞霞 (2009)、北京化工大学的张丽稳 (2012)、大庆石油学院的王尊策等 (2009)、西安石油大学的耿高峰 (2012)、四川大学的王志斌 (2006) 等. 虽然国内在油水分离技术领域的研究工作取得了一些成果, 但核心技术部件在工业实践过程中应用较少, 还没有获得广泛的应用及可观的社会效益. 究其原因, 其一是多数工作仍处于借鉴国外已有的成熟研究工作, 无论从理论基础还是工艺环节方面仍未能真正实现我国自主研发, 因此在经济成本及社会认可方面仍有待提高. 其二, 已有的油水分离技术仍然面临如稠油开采、井下分离、及深水作业等难题无法攻克, 因此给使用和推广工作造成一定困难. 其三, 传统的旋流分离技术仍旧面临压降巨大, 流场非均匀, 分离效率较低等无法回避的弊端. 因此, 迫切需要研制新型油水分离技术, 以解决深水平台、深海海底及采油井下等不同环境下油水分离存在的技术难题.

4.1 深水平台多相分离

我们知道, 与陆地油气开发不同, 海洋油气开发首先必须克服海洋环境 (海水、海浪、海流、海床等) 给生产活动带来的影响, 平台上使用的油水分离系统就是其中的关键技术问题之一. 因为油水处理系统极为庞大, 需要占用平台上大部分有效空间, 对同样的油水处理量, 若能减小分离器的体积, 则对使用空间极为缺乏的平台, 就具有极为重要的意义. 特别上述庞大的分离器及其附属系统具有很大的重量 (数百吨到数千吨), 而平台上的有效载荷对平台的造价也有很大影响. 据国外专家估计, 3 km 水深的油气开采平台上增加 1 kg 有效载荷, 则平台的造价就需要增加一万美元. 可见, 将现有的陆上油水分离技术直接应用到深海平台显得很经济. 因此, 如何结合我国海洋油气开发的实际情况, 研制出结构简单、体积小、重量轻、分离效率高、处理量大、容易安装维护、安全可靠的能应用于海上平台的油水分离器, 具有重要的现实意义和应用价值.

4.2 深海海底多相分离

为了有效地开发深水油气田, 降低生产成本, 20 世纪 70 年代初, 国际上提出了水下油气生产的新兴高技术. 该技术将全部油气开采和集输设备置于海底, 既可避免建造支撑系统的平台结构, 又利于实现全天候采油, 从而可大大提高生产效率, 缩减采油投资. 现在实施的水下生产系统只是将平台上油气生产的部分功能移到了水下, 而对产液的处理功能 (油水分离、废水、废沙、废气的处理/排放) 以及对油井的管理功能 (注聚、注水、产能调控、产量测量) 却难以在水下实现, 主要原因在于水下生产系统的三大核心技术问题没有很好解决 (见 表 1). 这三大核心技术就是油气水三相增压技术、分离技术和计量技术. 实际上, 20 世纪 80 年代初开始, 海洋油气业比较发达的国家, 都大力组织人力物力研发水下生产这项高新技术, 实施了如波赛顿计划等. 这些

表 1 海底油水分离技术分类

分类	设备	特点	水处理	砂处理
一类	分离器+多相泵	部分分离, 油水混输	部分回注	无
二类	多级分离器和撇油器 +多相泵或压缩机	全分离, 油气混输	大部分回注	必须处理
三类	多级分离器 +单相泵和压缩机	达标的全分离, 管线外输	全回注	必须处理

研究计划的主要内容包括多相混输系统的多相流技术, 多相增压泵技术, 多相计量技术和水下分离技术, 系统的密封、安装、维修、监测、操作、遥控、防护技术, 水下集输技术, 流动安全保障技术, 井口技术, 管汇技术, 动力技术等.

尽管人们一开始就把重点放在三大核心技术上, 但由于这三大核心技术本身的难点所在, 至今尚未取得实质性突破. 油气达到销售标准、水沙达到排放 (或回注) 标准的水下油气水沙分离还无法实现. 可见, 要想使水下生产技术得到重大突破, 真正实现将全部油气开采和集输设备置于海底, 不依赖水面设施的水下生产技术, 油气水沙的水下分离成为最关键的必须解决的问题. 同时, 水下分离还可降低井口压力, 进而提高产量和采收率; 且使边际油田开发和卫星油田开发长距离接入现有设施成为可能; 水下除水可简化水面的水处理工艺、节省处理设备; 生产水海底回注还可节省大量能源、改进生产管理、保障流动安全、减少环境污染.

到目前为止, 水下处理技术发展得最为完善的是美国富美实技术公司 (FMC Technologies). 他们先后为挪威国家石油公司、壳牌公司、巴西国家石油公司、道达尔等公司设计了多套水下分离系统 (见 表 2). 特别是 2007 年, 他们为挪威国家石油公司、埃克森美孚公司、道达尔公司设计建造了第一台水下三相分离系统, 并用于北海 220 米水深海底的托蒂斯油田 (见 图 7). 该分离系统重量达 1200 吨, 处理能力为 20 万桶/天. 经该系统处理后, 含水约为 10% 油水混合液经多相泵输送到陆地, 含油约为 1g/L 的生产水就地回注到地层. 使用该系统后, 原油采收率从 49% 提高到 55%, 可多采原油 3500 万桶, 经济效益非常显著. 但由于该系统分离器直径较大, 无法适应深水环境. 为了进入更深的水域, 美国富美实技术公司利用水力旋流的离心分离原理, 设计出 5 级分离的紧凑型油气水处理系统 (图 8). 该系统在海上平台测试出良好的效果, 尚需海底环境的应用验证和水深限制验证.

原则上, 水下多相分离器能实现生产水的就地回注. 既减少输送量, 又省去了注入海水的淡化处理, 还减小了摩阻损失、背压、管道尺寸, 可有效避免水合物的生成. 同时, 对低气液比的油井, 既可将分离出的气回注地层以提高产量, 还可节省平台上



图 7

富美实公司为托蒂斯油田设计的水下油气水分离器

表 2 富美实公司设计的水下分离系统

油田	客户	地区	年份	面临的问题	富美实公司解决方案
托蒂斯	挪威国家石油	北海	2005	产出液中大量含水	带有除砂装置的 油水分离器
BC-10	壳牌	巴西	2006	重质油且渗透压力低	带有电潜泵及控制模块的 水下气液分离器
珀迪多	壳牌	墨西哥湾	2007	重质油且渗透压力低	带有电潜泵的 水下气液分离器
喀斯喀特	巴西国家石油	墨西哥湾	2007	重质油且渗透压力低	海底水平安装电潜泵
派思弗雷	道达尔	西非	2008	聚合物堵井风险 且渗透压力低	提供海底动力的 气液分离系统

的天然气处理设施. 可见, 多相分离器是海洋石油水下生产系统中一举多得的关键设备, 与紧凑、快捷、高效的多相分离相关的多相流技术将成为水下处理技术和海洋石油开发流动安全保障技术研究和发展的重点.

4.3 采油井井下油水分离

为了解决高含水采油的巨大能耗和污染问题, 1991 年位于加拿大埃德蒙顿市的前沿工程研究中心率先提出“井下油水分离”的创意与设想, 井下油水分离是将油水分离器直接安装在井底, 分离出产液中的绝大部分水直接注入到井下合适的层位, 只将富含油的一部分液体提升到地面, 从而能极大地简化油田产液的水处理系统 (Michdet et al. 1996), 并能节省大量的将水从几千米深的井底提升到地面和从地面将水回注到

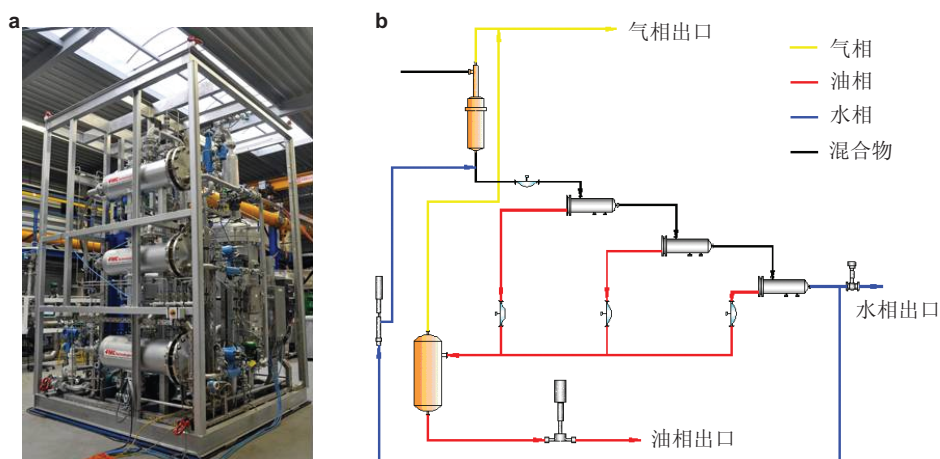


图 8

富美实公司设计的紧凑型油气水处理系统. (a) 样机, (b) 工艺流程

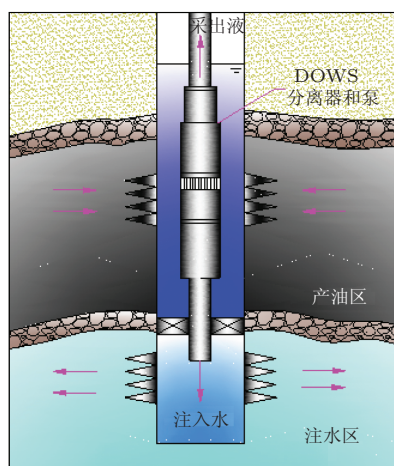


图 9

井下油水分离的基本理念

地层的能量. 因此, 该技术引起了石油工业界和相关技术领域的高度重视 (Zhang Y et al. 2009). 图 9 给出了井下油水分离理念示意图.

油井产出液的井下分离技术能带来诸多益处: (1) 降低原油生产费用, 该技术能将超过 70% 的生产水从井底直接回注到地层, 节省了该水量提升到地面的费用、后期深度处理费用、从地面回注到地层的费用 (如果回注) 等; (2) 能减少地面污水排放量和可能的污水泄漏, 可减少对环境的污染和破坏, 有利于节能减排和环境保护;

(3) 由于大幅度减少地面产出液处理量, 地面的油水分离系统、管汇系统、后期污水深度处理系统、泵和阀门系统等在尺度上都能得到大幅度缩减, 从而节省相应费用等;

(4) 生产水回注可提高地层压力以及产液井底处理可降低井底压力, 进而可大幅度提高油井产量和油田采收率. 国外有报道使用该技术效果最好的三口井原油产量增加幅度在 457% 到 1162%(Veil et al. 1999, 2001).

虽然目前国外的井下油水分离的系统技术相对成熟, 但由于分离器必须放在最大直径不超过 200mm 的井眼里, 且在井眼里还必须装备回注水和提升油的泵输系统和相应的连接管汇系统和控制系统, 所以井下油水分离器的结构受到严酷的限制. 位于加拿大埃德蒙顿市的前沿工程研究中心所研制的井下油水分离系统日处理量都基本在 500 m³ 以下, 对仅限于高含水油井的井下分离, 分离器昂贵的价格加上井下分离复杂的工艺与操作控制流程, 使得该技术难以大规模推广. 加拿大埃德蒙顿市前沿工程研究中心所研制的井下油水分离系统在现场使用的情况见表 3. 实际上, 对含水 90% 以上的油井, 井下分离的日处理量突破 1200 m³, 才具有较好的经济效益. 我国石油生产处于高含水的现状 (平均含水超过 90%), 比其他任何国家都更需要井下油水分离技术, 因为它对我国节能减排的意义显得更为重大和迫切, 所以近年来该技术引起了国内石油行业、科技界及学术界的广泛重视. 但不解决分离器的处理量问题, 就无法推广使用井下分离技术. 显然, 传统的重力分离、膜分离、锥形水力旋流分离等技术, 在受限的井眼空间里, 根本无法解决大规模提高处理量的难题. 因此, 只有提出比传统方

表 3 井下油水分离系统现场使用情况 (数据来自美国石油技术局)

操作井名称	井下油水分离 系统类型	产量 (桶/天)			
		应用井下油水 分离系统前		应用井下油水 分离系统后	
		油	水	油	水
因皮里尔 #1-26	水力旋流器	19	1780	24	59
安德森 08-17	水力旋流器	176	3648	264	264
加拿大海湾 02/12-01	水力旋流器	21	1038	117	217
帕夏 00/07-09	水力旋流器	19	352	62	250
帕夏 00/02-09	水力旋流器	13	428	164	239
雪佛龙 PNB 14-20	重力分离器	75	517	84	14
斯特金南	重力分离器	27	932	26	179
三星西尔万湖	重力分离器	35	403	N/A	57
克雷斯特西尔万湖 00/08	重力分离器	25	315	2	54
平均产量		46	1001	93	149

法更有效的油水分离技术,才有可能解决井下油水分离的实际问题,为我国的节能减排作出贡献。

5 新型管道式油水分离技术

从以上的介绍我们看到,由于油井产出液具有复杂的力学、物理、化学性质,导致油水分离成为很复杂的工艺过程。实际工程实践中,人们也试图充分利用这些性质,提出了各种各样的分离手段和方法来解决油田的油水分离问题,但仍然存在油水处理系统过于庞大、工艺流程复杂,难以解决深海海底分离和采油井井底分离等诸多难题。实际上,从力学的角度,要解决这些难题,首先需要解决以下 4 个主要问题:一是使离散相具有尽可能大的最终沉降速度;二是使油水相间处于游离状态,即使油水乳化液实现充分的破乳;三是使离散相有尽可能大的粒径和粒径分布;四是分离器沿一个方向的截面尺寸要尽可能小并具有较大的日处理量。

实际上,在圆柱管道中使油水混合液产生高速旋流,就有可能同时解决以上 4 个问题。首先,圆柱管道中的高速旋流的离心加速度可达重力加速度的数百倍到数千倍,可使离散相获得很高的最终沉降速度;其次,破乳剂在强旋流流场中可与油水乳化液充分混合和搅拌,使破乳效果比沉降罐中显著提高,且破乳时间和所需温度还能显著降低;再者,油水乳化液经高速旋流破乳后,粒径很小的油滴经湍流流场的混合和聚并,能形成大颗粒的浮油状态;最后,圆柱型管道的截面尺寸可以控制到很小(通常内径 50~100 mm),直径 100 mm 的圆柱型旋流分离器的每天可处理 2 000 m³ 的油水混合液,可见这种结构的分离器无论是用在深海海底还是采油井井底都不会有任何问题,用于深海平台和超稠油处理就显得更为容易。

力学研究所经过多年的探索,提出了油水处理新途径,创造性地提出了以圆柱型管道旋流器为主,结合 T 型多分岔管路和动态气浮选组成的新型管道式油水分离技术,它具有处理速度快、效率高、占地面积小等优势,符合目前石油工业对分离系统的发展需求,具有广泛的应用前景(见图 10)。该技术核心是通过油水混合液在柱型管道旋流器中的高速旋流和在 T 型管中的动态分层交换实现油水在管道中的快速分离,从而突破了传统的采用大型储罐进行油水分离的作法,使分离效率成倍提高。这种小型、紧凑、高效、快速的分离装置,由于体积小,级数少,占地省,具有经济(可减少甚至取消大型沉降罐设备和加热设施)、节能(可在比传统重力式分离操作温度低约 20°C 的温度下操作)、简捷(油水处理可通过一级撬装设备实现,可有效减少储罐系统、加热系统、电脱水系统、污水处理系统及消防系统、以及相应的管汇系统和控制系统)、安全(在低压、密闭条件下操作,具有很高的安全度,且工艺流程简单,减少了危险点源)等优点,从而可极大地节省油田原油处理的投资费用,对我国油田的开

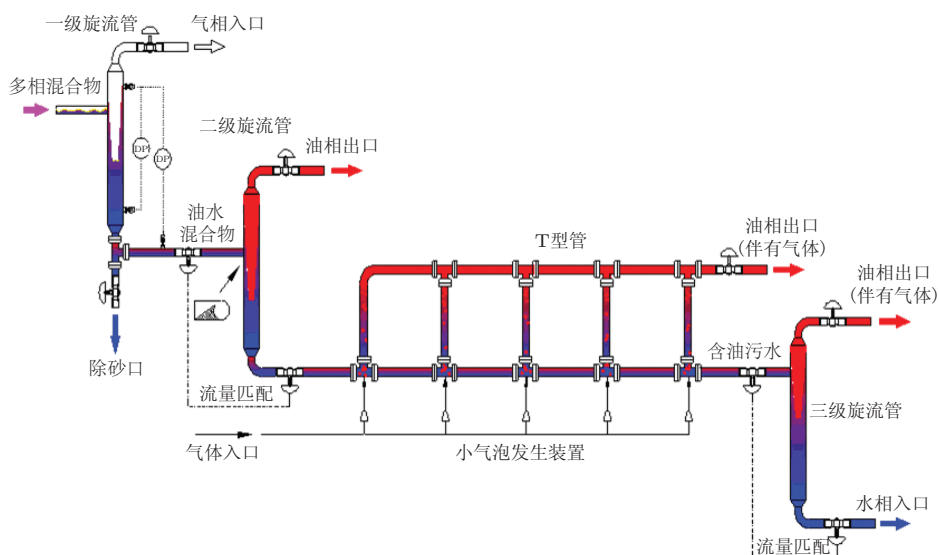


图 10

新型管道式油水分离系统示意图

发和工艺进步能起到积极作用。

5.1 柱型管道旋流器

柱型管道旋流器是由水平切向入口、旋流器主体、溢流口和底流口所构成的管道式分离设备(图 11)。油水两相混合液经水平管道以切线方式进入旋流器内,产生高速旋转运动,而由于油、水两相存在密度差异,各相产生不同的离心力。重质相水在离心力作用下流向旋流器边壁,并由内部压力场的作用向下流动从底流口流出,轻质相油则在旋流器中心处聚集,同样,由内部压力场的作用向上流动从溢流口流出,完成油水两相分离。

图 12 是柱型管道旋流器内油核形状随着分流比的变化关系。可以观察到,当分流比为 0 时,即进入柱型旋流器的油水混合液全部从底流口流出,虽然在旋流器内部能观察到油核,但是油核形状比较模糊,贯穿于整个柱体,此时油水两相不能得到有效分离;当增大分流比时,油核从溢流口处流出,柱体内部的油核形状清晰可见,油水混合液得到了有效分离,但在底流口液流中仍能观察到少量油滴;继续增大分流比,更多的液样从旋流器溢流口流出,旋流器内部的油核变得更加清晰,并且油核的尾部收结于旋流器的底流口上部,此时底流口液流中看不到油滴的存在;进一步增大分流比,从水平切向进入的大部分混合液携带油核从上面的溢流口排出,旋流管内油核呈细长状。从油核形状分布图中可以看出,柱型旋流器的分流比对其油水分离的性能具有重

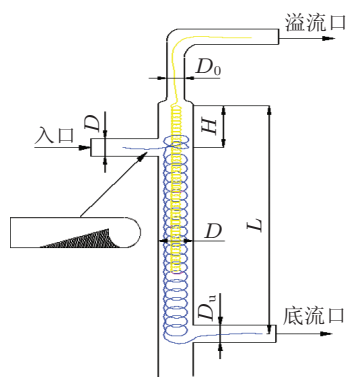


图 11

柱型管道旋流器

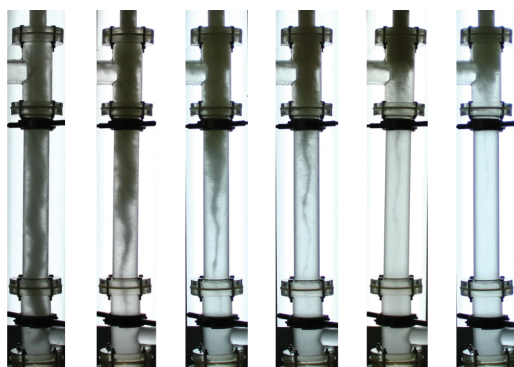


图 12

油核形状随着分流比的变化关系 (由左向右, 分离比从 0 增加到 1)

要的影响.

图 13 给出了一定的入口含油率下, 溢流口含油率随分流比的变化关系. 可以看出, 随着分流比的增加, 溢流口液样中的含油率出现先增加后降低的趋势. 这是因为在分流比较低时, 混合液进入柱型旋流器体后, 只有很少的一部分液体从溢流口排出, 在旋流器中心形成的油核不能尽快从溢流口排出. 当适当增加分流比后, 有更多的液样通过溢流口排出, 从而携带了更多的油核, 所以随着分流比的增大, 溢流口液样的含油率也随着增大. 然而, 当分流比增大到一定值后, 继续增大分流比, 并不能提高溢流口的含油率, 只是将混合液中的清水更多地从溢流口排出, 从而导致了溢流口液样含油率的降低.

目前, 自主研发的柱型旋流分离器已经广泛应用或中试于辽河油田、胜利油田、

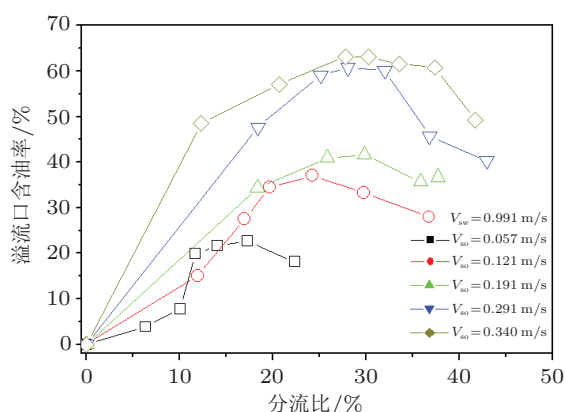


图 13

溢流口含油率随分流比的变化关系

南海海上采油平台等生产现场, 其处理效果均优于已有分离技术, 达到国际水平. 由于柱型分离器具有处理速度快、便于操作、占地面积小、分离效率高等优点, 因此具有广泛的应用前景 (Liu et al. 2010, 史仕炎等 2011).

5.2 导流片型管道式分离器

导流片型管道式分离器是通过对井下油水分离技术和研究现状的调研, 分析井下油水分离的需求, 探讨适合井下应用的分离器结构形式过程中发展得到的一种新型的分离技术和设备, 结构示意图如 图 14 所示. 其结构由入口处固定倾斜安装在管道中 2 片或以上的导流片, 导流片沿管道的周向均布, 并在管道的轴向依次叠置, 导流片安装之后, 有一段长度约为管径 12 倍的稳流直管段, 紧邻直管段的是一段逐渐缩径的除水管道, 在除水管道上沿管的轴向方向开设有一组以上的除水孔, 除水孔的外圆周面与所述除水管道的内壁相切, 孔径一般在 5 mm 以内, 除水管道和与其同轴的外筒所形成的腔室, 腔室上开有与其侧壁相交的出口管道. 来液由分离器入口进入, 经由安装在管道内的导流片部件, 在管道内形成稳定的强旋流场, 因而密度较小的相在管道轴心处形成核, 密度较大的相在管道壁面周边形成环状, 达到两相分离的目的.

图 15 给出了入口流量为 $3\text{m}^3/\text{h}$ 下, 导流片型管道式分离器的流场分布. 可以看出, 不同于传统的锥型分离器, 该分离器的轴向速度出现 3 个峰值, 且为同向流动, 因此更容易形成稳定的流场结构 (Shi & Xu 2015). 同时, 切向速度在中心区域呈现近似线性关系, 在壁面附近的区域呈现准自由涡分布规律. 为了简化分析, 可将其分为 2 个区, 以最大切向速度所在的径向位置处为分界点, 由于两部分的速度分布并不是严格的强制涡分布和自由涡分布, 故称为拟强制涡区域和拟自由涡区域.

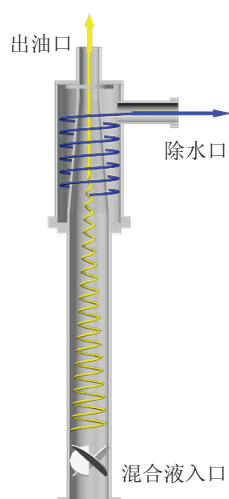


图 14

导流片型油水分离器结构示意图

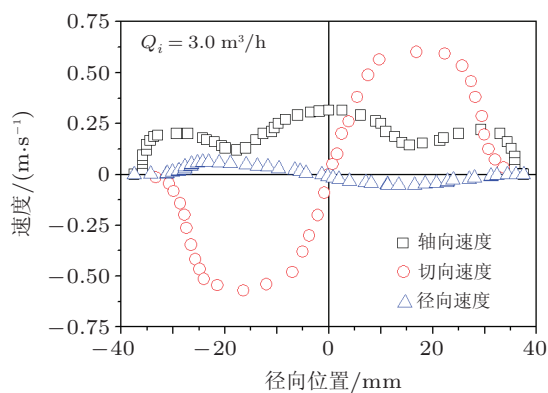


图 15

导流片型管道式分离器的流场分布

图 16 为三叶片 20° 的导流片型分离器, 在入口含油率 8%, 混合流量 $3.53 \text{ m}^3/\text{h}$ 的工况下, 不同分流比时油核形状. 从图中可以看出, 随着分流比增大, 油核逐渐变粗, 当分流比较小时, 大部分来流从出油口流出, 上出口截面的平均轴向速度大, 油核的平均轴向速度较大, 油核迅速从出油口流出分离器; 当分流比增大到 87% 时, 在入口来流工况不变的情况下, 大部分来流从除水口流出, 小部分来流从出油口流出, 出油口的平均轴向速度减小, 油核的平均轴向速度减小, 停留在分离器中的油增加.

导流片型管道式分离技术的优点是体积小、重量轻、占地少、处理时间短、分离

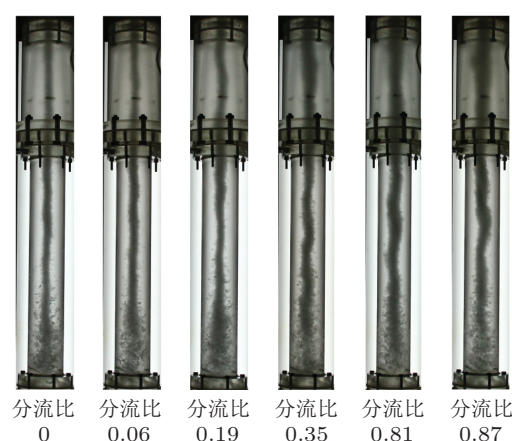


图 16

导流片型油水分离器内油水两相分布图

效率高、没有运动部件、易于操作维修。该分离器的研制使国内的井下旋流器研究跳出了仿制国外旋流器的路线 (Shi et al. 2012), 采用轴向入口的方式, 能够有效节约径向的占地空间, 促进其应用于生产油井井下, 将分离出的达标水相直接回注, 进一步降低将多余水相提升至地面的能耗。

5.3 T 型管道分离器

T 型管道分离器是一种利用油水滑移及惯性力等原理的动态分离技术, 结构示意图如图 17 所示。分离的基本原理是油水混合液在上下水平直管的流动过程中受重力作用使密度较大的水相下沉到管道的下部, 密度较小的油相上浮到直管的上部, 形成油水两相的分层流动 (Das et al. 2005)。当直管中分层的油水两相混合液达到上下 T 型分岔处时, 下管上层的油相沿垂直管上升流向上水平管, 而上管中下层的水相沿垂直管流向下水平管。这样通过多个 T 型分岔, 上直管中流动的就是含水极少的富油相, 而下直管中流动的就是含油极少的富水相, 使油水混合液在上下水平管和垂直管的流动过程中实现了油水的分层和含率的动态交换, 达到油水分离的目的 (Wang et al. 2008, 魏丛达等 2012)。

图 18 为一组特定工况下, 油水混合液进入 T 型管后的分离照片。可以看出, 当油水混合物进入多分岔管路后, 沿下水平管路第一个 T 型接头处即发生了明显的相分配不均现象, 表现在与 1 次上水平管路相比, 1 次下水平管路内的截面含油率要小得多。在此后的数次相分配中, 上、下水平管路内的油水两相进一步发生相交换, 下水平管路内的截面含油率明显减小, 以至于在 4 次下水平管路内油相仅以不连续的膜状存在于管截面顶部位置。图中, 与各个水平管路相对应, 在 1 次垂直管路内油相呈大小、

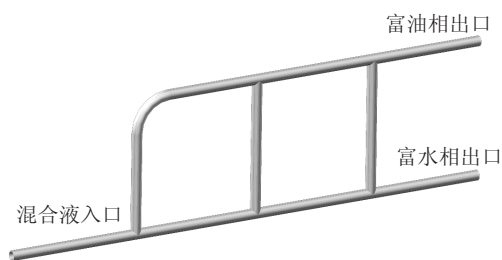


图 17

T 型管道分离器示意图

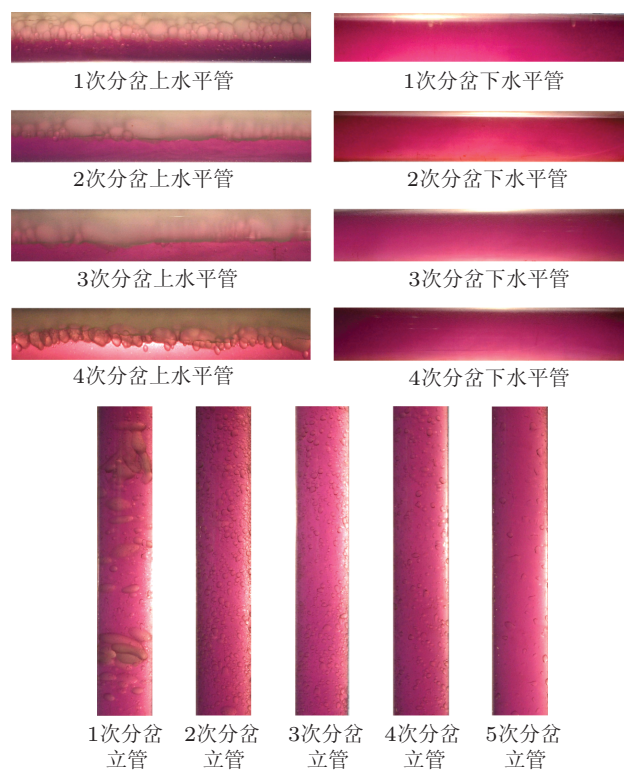


图 18

T 型管路内的油水分布图像

形状不一的块状形式, 并随部分水相流入上水平管路, 完成了主要的分离过程. 在后续的垂直管路中, 油相一般以液滴形式存在于水相之中, 这些垂直管路起到了进一步提高分离效率的作用.

图 19 给出了不同实验工况下的 T 型管分离效率. 可以看出, 单根 T 型管路的油

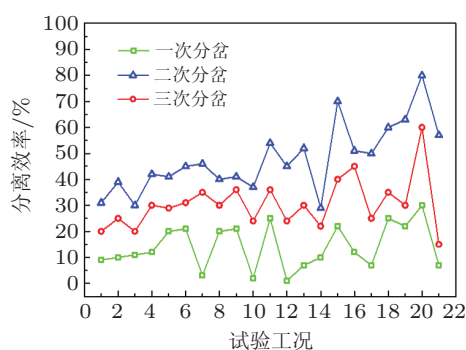


图 19

T 型管分离效率

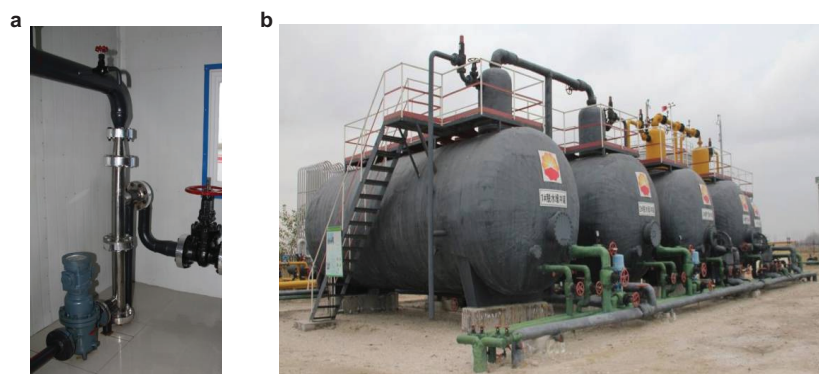
水分离效率一般低于 20%, 极少数工况下可以高于 30%。经过二根 T 管路后, 分离效率介于 20%~35% 范围内, 部分工况下超过了 60%。经过三根 T 管路后, 分离效率整体上有所上升, 基本稳定在 40%~55% 范围内, 最大值达到了 82.4%。

由于 T 型管道的结构简单, 目前该技术已经应用于石油工业生产现场, 均能够达到预期的分离效果, 简化了工艺处理流程, 且能耗和占地面积明显优于已有重力分离技术, 具有广泛的应用价值 (王立洋等 2009)。

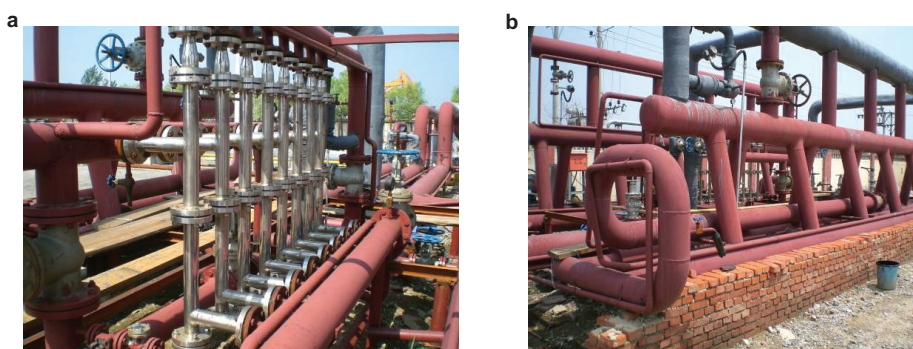
5.4 管道式分离技术工业应用的典型案例

管道式油水高效分离技术先后在华北油田采油二厂、大庆油田采油九厂、中海油天津渤西处理厂、中海油南海陆丰 13-1 和 13-2 平台、流花 11-1 平台等成功的进行了中试试验, 分离器性能和分离效果非常显著。以日处理 3000m^3 油水混合液为例, 按目前使用的传统工艺, 需采用大型储罐进行气液分离、换热器加温、油水重力沉降、高压静电脱水、含油污水处理等工序。每级储罐都需约 200m^3 体积, 占地在 1000m^2 以上, 投资 5000 万元以上。采用新型管道式分离技术, 整套设备的体积可减小到 100m^3 , 投资额可降低到 500 万元以下。同时, 分离后水中含油可小于万分之一, 再加一级处理就可达到排放标准, 环保效益明显。

截止到目前, 柱型管道式分离技术已经于 2011 年年底投入到辽河油田冷 13 站低温脱水系统的生产线中, 脱水温度可降到 32°C , 停炉后脱水油平均含水率 0.42%, 污水含油 1.5mg/L , 已经稳定地连续运行 3 年以上 (见 图 20)。柱型管道旋流器与 T 型管道相结合的高效管道式分离系统, 也已于 2015 年初在辽河油田冷加作业五区用于超稠油脱水的生产。经连续测试结果表明, 可将密度为 0.99g/cm^3 的原油分离后, 水中含油小于 500mg/L , 成功的满足了设计要求和生产需要 (图 21)。

**图 20**

旋流管的工业应用. (a) 新型旋流分离器, (b) 原重力沉降分离器

**图 21**

旋流管+T型管的管道式分离器的工业应用

6 总结与展望

该文针对目前的油水分离技术进行了调研和分析,通过对油包水型原油乳化液的分离过程研究发现,加热法、化学法、电脱法、超声波法等脱水技术已成功的工业应用,其中热化学法、电化学法在油田油包水型原油脱水中得到广泛的应用;微波、旋流、磁处理等技术正处于研究阶段,通常需要配合化学、电脱法进行,目的是为了减少化学药剂的使用量;生物法主要用于污水处理.伴随着三次采油、注聚开采、边缘油田的开采等,低含水原油乳化液脱水过程更加困难,采用单一的破乳技术已无法满足石油工业生产的需要,必须集中各种破乳方法的优势,联合使用,从而得到较好的破乳效果,将高频脉冲电场、超声波、化学、离心、生物破乳这些方法结合起来使用,形成高效、无污染的破乳方法,未来应朝着缩短破乳时间、精简处理流程、降低能耗方向

发展, 是国内外学者在低含水原油脱水方面研究的主要方向. 油水分离方法的研究方向要紧紧密结合当前开采的现状与未来开采的趋势, 这样才能服务于油田. 同时, 对于我国石油开采来说, 目前急需水包油型原油乳化液分离技术的研发, 以解决我国目前以重力沉降预分为主的低效处理现状.

对于含油污水处理方法的研究发现, 含油污水的处理过程应该朝着低污染、低成本、易操作、结构紧凑等方向发展. 当前我国油田的重点已由以油气处理为中心转至以含油污水处理为中心, 随着环保意识的增强, 含油污水处理方面的投资将不断增加, 污水的常规处理技术已不能满足油田发展的需要, 在此背景下, 采用单一的方法分离通常无法达到要求, 集成重力、离心、聚结、絮凝、气浮等多种分离原理的综合运用, 研发的设备将向高效节能和多功能化等方向发展.

随着海上油气开发向深海迈进, 深海平台的油水分离、深海海底的油水分离、采油井井底油水分离等都迫使人们探索新的分离技术. 因此, 研制小型、高效的适合不同环境的管道式分离器是一种手段, 它可将油水的分离过程限制在管道式的分离器件中进行, 这样就可以采用集成式的管道式结构系统取代以前庞大的储罐式系统实现油气水的经济、高效、快捷、低能耗处理. 同时, 由于采用管道式结构, 深海海底的高水压、采油井井底的狭窄空间、海洋平台的受限空间和受限载荷的难题都能迎刃而解.

最后, 针对目前油水分离中亟待解决的重点问题, 介绍了力学研究所研发的具有自主知识产权的新型管道式油水分离技术, 构成部件主要包括: 柱型管道旋流器、导流片型管道式分离器、以及 T 型管道分离器等. 新型管道式油水分离技术, 仅依靠物理的方法, 即可实现在井口产出液输送过程中的动态油水分离. 因而具备了可靠性高、操作简单、处理效率高、占地面积小、重量轻、成本低、耐压性高、无二次污染等优点, 并实现了连续动态化的井口产出液处理, 满足了工业现场处理量大的生产需求, 各项处理指标均已达到世界领先水平. 新型管道式油水分离技术不仅在陆地油田作业中取得了良好的应用效果, 同时具备了良好的海上平台作业适用性, 甚至还为海底作业、井下分离等领域的拓展, 提供了其他方法无可比拟的技术优势. 下一步, 也为我国继续实施海洋强国战略, 为彻底解决海洋油气开采环节中的一系列技术难题, 指明了研究工作的发展方向.

参考文献

- 陈晓东, 侯雯雯, 陈君, 黄瑾. 2014. 陕北油田原油沉降罐加热盘管防腐技术探讨. 腐蚀科学与防护技术, 26: 191-193 (Chen X D, Hou W W, Chen J, Huang J. 2014. Research on corrosion prevention technology in heating coils of settling tank in Shanbei oil field. *Corrosion Science and Protection Technology*, 26: 191-193).
- 陈文征. 2008. 波纹板油水分离技术研究 [硕士论文]. 北京: 中国石油大学 (Chen W Z. 2008. Study on the technology of corrugated plate oil-water separation [Master Thesis]. Beijing: China University of

- Petroleum).
- 邓晓辉, 许晶禹, 吴应湘, 罗东红. 2011. 动态微气泡浮选除油技术研究. 工业水处理, **4**: 89-90 (Deng X H, Xu J Y, Wu Y X, Luo D H. 2011. Research on the technology of oil removal by dynamic state micro-bubbles flotation. *Industrial Water Treatment*, **4**: 89-90).
- 丁九亮. 2001. 生物处理方法在渤西终端含油污水 COD 处理工艺中的应用. 中国海上油气, **13**: 1-7 (Ding J L. 2001. Application practice of biological method in the COD process for oily water at Boxi Terminal. *China Offshore Oil and Gas*, **13**: 1-7).
- 董雯婷. 2013. 沉降罐内油水分离特性研究及结构优化 [硕士论文]. 大庆: 东北石油大学 (Dong W T. 2013. Oil-water of sedimentation tank separation characteristics and structural optimization [Master Thesis]. Daqing: Northeast Petroleum University).
- 杜红勇. 2005. 双锥型油水分离器的 CFD 仿真研究 [硕士论文]. 成都: 西南石油学院 (Du H Y. 2005. The computational fluid dynamics simulation study of toroidal swirl type oil and water separation device [Master Thesis]. Chengdu: Southwest Petroleum University).
- 杜荣熙. 1999. 过滤法原油脱盐脱水技术研究. 石油炼制与化工, **30**: 10-14 (Du R X. 1999. Crude desalting and dewatering by filtration technology. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, **30**: 10-14).
- 冯志强, 杨永军, 朱成君, 张绍东, 李忠, 郑树贵, 沈岳, 赵焕卿. 2004. 原油生物破乳剂的研究与应用. 石油大学学报, **28**: 93-95 (Feng Z Q, Yang J J, Zhu C J, Zhang S D, Li Z, Zheng S G, Shen Y, Zhao H Q. 2004. Crude oil demulsification and pilot testing with biodemulsifier. *Journal of China University of Petroleum*, **28**: 93-95).
- 耿高峰. 2012. 旋流器内部流场数值仿真 [硕士论文]. 西安: 西安石油大学 (Geng G F. 2012. Numerical stimulation of deoiling hydrocyclone [Master Thesis]. Xi'an: Xi'an Shiyou University).
- 龚道童, 吴应湘, 郑之初, 郭军, 张军, 唐驰. 2006. 变质量流量螺旋管内两相流数值模拟. 水动力学研究进展, **21**: 640-645 (Gong D T, Wu Y X, Zheng Z C, Guo J, Zhang J, Tang C. 2006. Numerical simulation of the oil-water two-phase flow in a helical tube with variable mass flow rates. *Journal of Hydrodynamics*, **21**: 640-645).
- 顾大明, 王吟, 宋中健. 2005. 粗粒化聚并法油水分离技术. 哈尔滨建筑大学学报, **35**: 65-67 (Gu D M, Wang Y, Song Z J. 2005. Removal of oil from waste water by coalesce. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, **35**: 65-67).
- 贺会群, 李大桥, 于兴军, 肖莉, 刘春全, 艾志久. 2005. 螺旋式油水分离装置分离行为仿真研究. 石油机械, **33**: 1-3 (He H Q, Li D Q, Yu X J, Xiao L, Liu C Q, Ai Z J. 2005. Simulation of separation of oil-water mixture by helical oil-water hydrocyclone. *China Petroleum Machinery*, **33**: 1-3).
- 何玉辉. 2002. 含油污水处理技术的发展. 油气田地面工程, **21**: 55-56 (He Y H. 2002. The development of oily wastewater treatment technology. *Oil-Gas field Surface Engineering*, **21**: 55-56).
- 黄廷林, 宋维营, 赵建伟. 2003. 采油废水处理中核桃壳滤料再生技术研究. 西安建筑科技大学学报, **35**: 228-242 (Huang Y L, Song W Y, Zhao J W. 2003. Regeneration of contaminated walnut as filtrating medium in oily wastewater treatment. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, **35**: 228-242).
- 吉庆林, 高鹏, 陈自刚, 武青. 2013. 海上油田电脱分离器结构设计研究. 过滤与分离, **23**: 29-34 (Ji Q L, Gao P, Chen Z G, Wu Q. 2013. Research on the structure design of offshore crude oil electric dehydrator. *Journal of Filtration & Separation*, **23**: 29-34).
- 李广军, 郭烈锦. 2000. 螺旋管内油-水液液两相流流型. 化工学报, **51**: 239-242 (Li G L, Guo L J. 2000. Flow patterns of oil-water liquid-liquid two-phase flow in helically coiled tubes. *CIESC Journal*, **51**: 239-242).

- 李国珍, 肖华, 董守平. 2001. 油水分离技术及其进展. 油气田地面工程, **20**: 7-9 (Li G Z, Xiao H, Dong S P. 2001. Technology and development of oil water separation. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, **20**: 7-9).
- 李秦, 董冰. 2010. 稠油脱水的优化方法. 辽宁化工, **39**: 1270-1272 (Li Q, Dong B. 2010. Optimization method of heavy oil dehydration. *Liaoning Chemical Industry*, **39**: 1270-1272 (in Chinese)).
- 李秦. 2011. 盐辅助稠油微波脱水机理研究 [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学 (Li Q. 2011. Experimental research on the microwave treatment of heavy oil with salt [Master Thesis]. Xi'an: Xi'an Shiyou University).
- 李雪辉. 2002. 油田采出水过滤器的原理与应用. 石油机械, **30**: 56-58 (Li X H. 2002. The principle and application of the oilfield produced water filter. *China Petroleum Machinery*, **30**: 56-58).
- 李相远, 邵长新, 万世清, 张传江, 宋波. 2005. 核桃壳滤料粒径对油田污水过滤的影响研究. 石油机械, **33**: 23-25 (Li X Y, Shao C X, Wang S Q, Zhang C J, Song B. 2005. Influence of grain size of walnut shell filter material on oilfield waste water filtering. *China Petroleum Machinery*, **33**: 23-25).
- 林浩然. 2010. 油水分离器优选实验研究 [硕士学位论文]. 大庆: 大庆石油学院. (Lin H R. 2010. The study of optimization experiment of oil-water separator [Master Thesis]. Daqing: Daqing Petroleum Institute).
- 刘保君. 2013. 多杯等流型油水分离器优化设计及实验研究 [博士学位论文]. 大庆: 东北石油大学 (Liu B J. 2013. Structure optimization and experimental research of multicup isoflux oil-water separator [PhD Dissertation]. Daqing: Northeast Petroleum University).
- 刘贵喜. 1997. 脱油型水力旋流器分离准数模型的建立. 石油机械, **25**: 17-20 (Liu G X. 1997. Separation model for deoiling hydrocyclone. *China Petroleum Machinery*, **25**: 17-20).
- 马力强, 刘炯天, 岳广傲. 2009. 旋流-静态微泡浮选柱净化含油废水试验研究. 中国矿业大学学报, **38**: 554-557 (Ma L Q, Liu J T, Yue G A. 2009. Experimental study of treatment of oily waste water by a cyclone static micro-bubble flotation column. *Journal of China University of Mining & Technology*, **38**: 554-557).
- 马少华. 2013. 基于聚结技术的油水分离效果研究 [硕士学位论文]. 天津: 天津大学 (Ma S H. 2013. Oil and water separation based on coalescence technology [Master Thesis]. Tianjin: Tianjin University).
- 毛燎原, 赵杉林. 2006. 无机盐及海水作用下高稠油微波辐射法脱水研究. 炼油技术与工程, **36**: 15-18 (Mao L Y, Zhao B L. 2006. Study on microwave radiation in the dehydration of high-viscosity oil in the presence of inorganic salt and seawater. *Petroleum Refinery Engineering*, **36**: 15-18).
- 彭忠勋. 1994. 浮选机在油田含油污水处理中的应用. 石油规划设计, **5**: 49-50 (Peng Z X. 1994. Application of oil flotation tank in the treatment of oil containing water. *Petroleum Planning & Engineering*, **5**: 49-50).
- 任彦中. 1995. 高效双向过滤器. 油气田地面工程, **14**: 44-45 (Ren Y Z. 1995. High efficiency bidirectional filter. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, **14**: 44-45).
- 史仕荧, 邓晓辉, 吴应湘, 马乃庆. 2011. 操作参数对柱形旋流器油水分离性能的影响. 石油机械, **39**: 4-7 (Shi S Y, Deng X H, Wu Y X, Ma N Q. 2011. The effect of operational parameters on the oil-water separation performance of the cylindrical cyclone. *China Petroleum Machinery*, **39**: 4-7).
- 宋金璞, 邵景玲, 赵志伟. 2001. 多级电磁器处理原油生产性试验. 哈尔滨建筑大学学报, **34**: 53-56 (Song J P, Shao J L, Zhao Z W. 2001. Treatment of crude oil with electromagnetic equipment with multi-magnetic poles. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, **34**: 53-56).
- 孙中雪. 2013. 生物可降解材料 PLA 在油水分离方面的研究与应用 [硕士学位论文]. 东北师范大学. (Sun Z X. 2013. Research and application for oil/water separation based on biodegradable materials PLA [Master Thesis]. Northeast Normal University)

- 孙宝江, 颜大椿, 乔文孝. 1999. 乳化原油的超声波脱水研究. 声学学报, **24**: 327-331 (Sun B J, Yan D C, Qiao W X. 1999. The study of demulsification with ultrasonic irradiation on oil emulsion. *Acta Acustica*, **24**: 327-331).
- 谭晓飞. 2007. 超声辐射原油破乳技术的研究 [硕士学位论文]. 天津: 天津大学 (Tan X F. 2007. Study on demulsification of crude oil emulsions via ultrasonic irradiation [Master Thesis]. Tianjin: Tianjin University).
- 佟曼丽. 2000. 油田化学. 北京: 石油工业出版社, 167-182 (Tong M L. 2000. Oil Field Chemistry. Beijing: Petroleum Industry Press, 167-182).
- 王立洋. 2009. 分岔管路内的油水两相流动研究 [博士学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Wang L Y. 2009. An investigation on oil / water two-phase flow inside T-junction pipelines [PhD Dissertation]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences).
- 王学会, 朱春梅, 胡华玮, 束松矿, 张宗愚. 2002. 原油破乳剂研究发展综述. 油田化学, **19**: 379-381 (Wang X H, Zhu C M, Hu H W, Shu S K, Zhang Z Y. 2002. A review on researches and developments of crude oil demulsifiers. *Oilfield Chemistry*, **19**: 379-381).
- 王志斌. 2006. 水力旋流器分离过程非线性随机特性研究 [博士学位论文]. 成都: 四川大学 (Wang Z B. 2006. Research on nonlinear stochastic characteristics of separation processes in hydrocyclones [PhD Dissertation]. Chengdu: Sichuan University).
- 王尊策, 于玲玲, 徐艳, 王家新, 苑井武. 2009. 井下油水分离旋流器大锥角参数优化. 大庆石油学院学报, **33**: 78-80. (Wang Z C, Yu L L, Xu Y, Wang J X, Yuan J W. 2009. Optimization of the large cone angle parameters of downhole oil/water separation. *Journal of Daqing Petroleum Institute*. **33**: 78-80).
- 魏丛达, 许晶禹, 王立洋, 刘海飞, 吴应湘. 2012. T形管内油水两相流动规律及其应用. 油气储运, **31**: 923-926 (Wei C D, Xu J Y, Wang L Y, Liu H F, Wu Y X. 2012. The law of oil-water two-phase flow in T-shaped pipeline and its application. *Oil & Gas Storage and Transportation*, **31**: 923-926).
- 吴应湘, 魏丛达, 许晶禹, 罗东红, 许庆华, 吴奇霖, 陈颂阳, 张健, 杨浩波, 郭军, 张军, 陆忠韩. 2013. 一种含油污水旋流气浮分离装置. 中国: ZL201310245879.1 (Wu Y C, Wei C D, Xu J Y, Luo D H, Xu Q H, Wu Q L, Chen S Y, Zhang J, Yang H B, Guo J, Zhang J, Lu Z H. 2013. One kind of oily wastewater separation device by hydrocyclone and flotation. China: ZL201310245879.1).
- 夏楠. 2012. 粗粒化技术提高油水分离效率的实验研究 [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学 (Xia N. 2012. Experimental research of coarse graining technology in improving the efficiency of oil-water separation [Master Thesis]. Daqing: Northeast Petroleum University).
- 肖红. 2007. 三元复合驱采出液性质的研究及油水分离器的优化设计 [硕士学位论文]. 天津: 天津大学 (Xiao H. 2007. Study on properties of produced liquid from ASP flooding and optimal design of oil-water separator [Master Thesis]. Tianjin: Tianjin University).
- 徐远春, 崔连升, 耿艳楼. 1998. 生物破乳剂性能研究. 环境保护, **6**: 22-23 (Xu Y C, Cui L S, Geng Y L. 1998. Study on de-emulsification properties of a biosurfactant. *Technology of Pollution Control*, **6**: 22-23).
- 杨伟, 付秀勇. 2014. 超声波破乳脱水技术在塔河油田的应用. 天然气与石油, **32**: 23-24 (Yang W, Fu X Y. 2014. Application of ultrasonic demulsification dehydration technology in Tahe Oilfield. *Natural Gas and Oil*, **32**: 23-24).
- 叶国祥, 吕效平, 韩萍芳. 2009. 超声波在炼油厂原油破乳脱水脱盐中的应用. 石油学报, **25**: 119-123 (Ye G X, Lü X P, Han P F. 2009. Application of ultrasonic on refinery crude oil dewatering and desalting. *Acta Petrolei Sinica*, **25**: 119-123).
- 袁洪涛. 2004. 原油加热沉降器的运行故障及解决方法. 炼油与化工, **4**: 38-39. (Yuan H T. 2004. Operation fault of settler of crude oil heater and solution. *Refining and Chemical Industry*, **4**: 38-39).

- 张瑞霞. 2009. 电潜泵井下水力旋流油水分离系统匹配设计 [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学 (Zhang R X. 2009. The matching design of downhole oil-water separation system with electric submersible pump and hydrocyclone [Master Thesis]. Beijing: China University of Petroleum).
- 张红, 李少平. 2000. 磁处理原油脱水实验研究. 油气田地面工程, **1**: 2-30 (Zhang H, Li S P. 2000. Experiment of magnetic treatment on dehydration in crude oil. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, **1**: 2-30).
- 张李. 2005. 重力式油水分离器中的流体力学研究 [硕士学位论文]. 天津: 天津大学 (Zhang L. 2005. Research on the hydrodynamics of a primary oil/water separator [Master Thesis]. Tianjin: Tianjin University).
- 张丽稳. 2012. 海上用井下油水分离系统旋流分离器研究 [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学 (Zhang L W. 2012. Research on hydrocyclone used in downhole oil-water separation of offshore oil field [Master Thesis]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology).
- 赵杉林, 毛燎原. 2007. 海水稀释-微波辐射协同作用高稠油脱水研究. 石油学报, **23**: 62-66 (Zhao B L, Mao L Y. 2007. Study on the dehydration of high-viscosity oil under joint action of seawater dilution and microwave radiation. *Acta Petrolei Sinica*, **23**: 62-66 (in Chinese)).
- 周永, 吴应湘, 郑之初, 刘秋生, 李清平. 2004. 水分离技术研究之一直管和螺旋管的数值模拟. 水动力学研究与进展, **19**: 540-546 (Zhou Y, Wu Y X, Zheng Z C, Liu Q S, Li Q P. 2004. Research on oil-water separation technique numerical simulation in both straight and helical pipes. *Journal of Hydrodynamics*, **19**: 540-546).
- 朱林, 熊滨莎, 曲哲. 1994. 原油磁处理降粘研究. 油气田地面工程, **3**: 26-31. (Zhu L, Xiong B S, Qu Z. 1994. Research in the viscosity reduction of magnetic treatment on crude oil. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, **3**: 26-31 (in Chinese)).
- Barnickel W S. 1914. Process for treating crude oil: US, 1093098.
- Com B E P, Rou D D, Despau X G. 2001. Emulsion characterization by focused ultrasonic waves. *Ultrasonics*, **39**: 329-334.
- Colic M, Morse W, Miller J D. 2007. The development and application of centrifugal flotation systems in wastewater treatment. *International Journal of Environment and Pollution*, **30**: 296-312.
- Colman D A, Thew M T, Corney D R. 1980. Hydrocyclones for oil-water separation. In: Proc. of the 1st International Conference on Hydrocyclones, BHRA, Cambridge, UK, **11**: 143-165.
- Davis R M, Hadley H W, Paul J M. 1995. Method and apparatus for breaking hydrocarbon emulsion: US, 5885424.
- Das G, Das P K, Azzopardi B J. 2005. The split of stratified gas-liquid flow at a small diameter T-junction. *International Journal of Multiphase Flow*, **31**: 514-528.
- Eric J. 1987. Process and apparatus for the removal of oil from an oil-in-water dispersion: Europe, 0119637 A2.
- Gay J C, Triponey G, Bezaud C, Schummer P. 1987. Rotary cyclone will improve oily water treatment and reduce space requirement/weight on offshore platforms. Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX.
- Guo-Kun Q. 2005. Analysis on factors influencing crude oil demulsification effectiveness by ultrasonic wave. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, **12**: 76-78.
- Hana M, Liverud J, Gulbraar A, Bolstad G. 2005. Compact electrostatic coalescer (CECTM) technology—an FPSO experience for innovative separation technology. Advances in Multiphase Separation and Multiphase Pumping Technologies Conference, Aberdeen, UK: 1-2.
- John S E, Mojtaba G. 2002. Electrostatic enhancement of coalescence of water droplets in oil: a review of

- the technology. *Chemical Engineering*, **85**: 357-368.
- Li C Y, Liu X. 2012. Numerical simulation on oil-water separation in spiral pipe after different flow velocity. *Journal of Liaoning Shihua University*, **32**: 32-35.
- Liu H F, Xu J Y, Wu Y X, Zheng Z C. 2010. Numerical study on oil and water two-phase flow in a cylindrical cyclone. *Journal of Hydrodynamics*, **22**: 790-795.
- Michelet J F, Sangesland S. 1996. Downhole separation of oil and water. In: Proc. of the 9th Underwater Technology Conference Bergen, Norway.
- Miller J D, Hupka J. 1983. Water de-oiling in an air-sparged hydrocyclone. *Filtration & Separation*, **20**: 279-280.
- Nadarajah N, Singh A, Ward O P. 2002. Evaluation of a mixed bacterial culture for de-emulsification of water-in-petroleum oil emulsions. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **18**: 435-440.
- Oswaldode A P, Marcel V M, Rafael F J, Jesus R F. 2006. Advances in non-conventional flotation for oily water treatment. *Filtration*, **6**: 31-34.
- Singh B P. 1995. Laboratory test results on ultrasound treated industrial emulsion. *Acoustics Letters*, **19**: 78-82.
- Shi S Y, Xu J Y, Sun H Q, Zhang J, Li D H, Wu Y X. 2012. Experimental study of a vane-type pipe separator for oil-water separation. *Chemical Engineering Research and Design*, **90**: 1652-1659.
- Shi S Y, Xu J Y. 2015. Flow field of continuous phase in a vane-type pipe oil-water separator. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **60**: 208-212.
- Taggart D L, Sams G W, Wallace H G, Manen D R. 2008. Compact electrostatic separation process. Offshore Technology Conference.
- Tao R, Xu X. 2006. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field. *Energy & Fuels*, **20**: 2046-2051.
- Veil J A. 1999. Langhus B.G., Belien. DOWS reduce produced water disposal costs. *Oil & Gas Journal*, **97**: 76-85.
- Veil J A. 2001. Interest revives in downhole oil-water separators. *Oil & Gas Journal*, **99**: 47-56.
- Wang L Y, Wu Y X, Zheng Z C, et al. 2008. Oil-water two-phase flow inside T-junction. *Journal of Hydrodynamics*, **20**: 147-153.
- Ye G, Lu X, Han P, Shen X. 2010. Desalting and dewatering of crude oil in ultrasonic standing wave field. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **70**: 140-144.
- Zhang Y, Jiang M, Zhao L, Li F. 2009. Design and experimental study of hydrocyclone in series and in bridge of downhole oil/water separation system. In: Proc. of ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers: 429-434.

(责任编辑: 樊菁)

Current situation and development tendency of oil-water separation technology

WU Yingxiang XU Jingyu[†]

LMFS, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract With the growth of oil exploration lasting, the water content of output fluids is increasing year by year, and in some oil wells the water content has reached to 95% and above, which brings new challenges to the existing treatment technology. To solve these problems, it is urgent to develop a new kind of oil-water separation technology to break through the “bottle-neck” of traditional technology. In this work, combined with the current demands of the oil and gas exploitation, the current situation of oil-water separation technology has been introduced systematically, as well as the characteristics of oily wastewater treatment technology, and the new demand and futural development trend of oil-water separation technology. At the same time, a new kind of pipe-type oil-water separation technology, developed by the Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, has been introduced in detail, which includes cylindrical pipe separation technology, vane-type pipe separation technology, and T-type pipe separation technology. Due to the technical advantages of new pipe-type separation technology, it can solve practical engineering problems successfully, such as heavy oil exploitation, submarine operation, and downhole separation. Furthermore, the development direction of oil-water separation technology has also been specified in this work.

Keywords oil and water separation, oily wastewater treatment, pipeline-type separation technology

Received: 5 January 2015; accepted: 14 April 2015; online: 21 April 2015

[†] E-mail: xujingyu@imech.ac.cn

Cite as: Wu Y X, Xu J Y. Current situation and development tendency of oil-water separation technology.

Advances in Mechanics, 2015, 45: 201506

© 2015 *Advances in Mechanics*.



吴应湘, 中国科学院力学研究所研究员, 博士生导师. 1978年毕业于吉林大学数学系力学专业, 同年考上中国科学院力学研究所研究生, 师从学部委员林同骥院士, 1981年获硕士学位, 1989年获博士学位, 1991年至1992年在牛津欧共体联合聚变中心从事博士后研究工作, 1993年至1999年期间从事海洋工程流体外载和多相管流研究, 在海洋平台结构与载荷、多相流计量等方面提出多项新的见解, 2000年后进入油田开发与油气水处理技术研究领域, 2003年被中国科协评选为我国海洋工程领域学科带头人, 是中国科学院与中国海洋石油总公司“十五”重大合作项目首席科学家, 主持了中国科学院“九五”、“十五”、“十一五”重大项目, 国家科技重大专项子课题, 国家重大科学仪器设备开发专项, 中国科学院与英国皇家学会合作项目及其它多项科研项目.