

# 水下油气生产系统技术及基础设备发展与研究

宋 琳，杨树耕，刘宝珑

(天津大学建筑工程学院 天津 300072)

**摘 要：**水下油气生产系统是保证深海油气开采顺利进行的关键设备之一，它的研发与国家深海资源开发有着密切的联系。文章就国外水下油气生产系统基础设备，如水下采油树、水下管汇、脐带缆等的发展现状、结构形式以及安装与设计时的热点问题进行了介绍，并对水下生产系统整体发展进程进行了详细叙述，综合国内研发情况，为我国水下生产系统的研发提供学习和借鉴的建议。

**关 键 词：**水下生产系统；基础设备；发展研究

水下生产系统是由水下井口等整套水下生产设备及海底管道组成的海上油气生产系统。具有投资低，水下设备可重复利用，油井布置灵活，受自然灾害影响小等优势，广泛应用于深水油田以及边际油田的开发。

目前国内针对水下生产系统的研究仍停留在理论层面。王伟等<sup>[1]</sup>介绍了水下生产系统的采油树、管汇、跨接管和脐带缆的性能，以及在设计、分析时采用的公式和应注意的问题；王建文等<sup>[2]</sup>通过实例详细介绍了目前国内外水下生产系统几种常见的开发模式，并对采油树的选择以及脐带缆的设计进行了初步的探讨。针对水下生产系统局部设计和安装的探讨，张瑾等<sup>[3]</sup>通过对大量工程实例和开发方案的调研，总结了水下管汇的安装方法并比较各自的优缺点；肖能<sup>[4]</sup>对国外脐带缆设计研究进行了全面的跟踪，对脐带缆界面设计开展调研和总结；孙晶晶等<sup>[5]</sup>对脐带缆安装技术做了介绍，并结合国内外脐带缆安装技术应用水深情况做了对比分析。这些论述为水下生产系统的研究提供了一些参考，本研究将进一步就水下生产系统整体的结构，发展现状等方面进行深入的介绍。

## 1 水下生产系统概述

整个水下生产系统包括水下生产设施、水面依托支持设施、安装维护设施 3 部分，其作业原理为：从井底产出的油气经井口、采油树，依次流经跨接管、管汇、流动管线和立管等，

到达海面处理设施，经处理后从输油管线或油轮输送至岸上。

国外对水下生产系统基础构件的研究较早，早在 20 世纪 50 年代末期，世界第一座水下低压气井在美国伊利湖应用，利用凯利钻探阀作为主控阀，橡胶软管作为管线，拉开了水下生产系统应用的序幕 [图 1 (a)]。1963 年，Texaco 公司安装了水深仅 6.096 m 的水下井口，对于未来液压阀驱动器和远程控制系统的的发展有深远的影响 [图 1 (b)]。20 世纪 60 年代中期，Shell 公司在加利福尼亚海岸建造了第一代为水下生产建造而非陆上改造的水下采油树，该系统持续生产作业近 20 年 [图 1 (c)]。70 年代，Lockheed 公司研发了潜水舱，允许在一个大气压的环境下，工人通过潜水舱下潜，在井口处安装并操作，但最终由于人员风险等问题放弃了此方案 [图 1 (d)]。同期，Phillips 公司对北海的 Ekofisk 油田进行经济评价，为加快开采进程，提出了使用改装的固定式钻井平台与多井口相连接的构想 [图 1 (e)]。80 年代末，Phillips 公司在西非象牙海岸油田的开发中使用海底完井技术，水深介于 243~762 m。1992 年，Exxon 公司着手开发墨西哥湾的 Zinc 油田，水深达 518.16 m，应用了整体管汇系统，加快了水下生产系统开发的进程 [图 1 (f)]。2000 年后，Amoco 公司致力于开发墨西哥湾的深水油田项目，计划钻井 8—

10 口，水深达 1 645.92 m [图 1 (g)]。

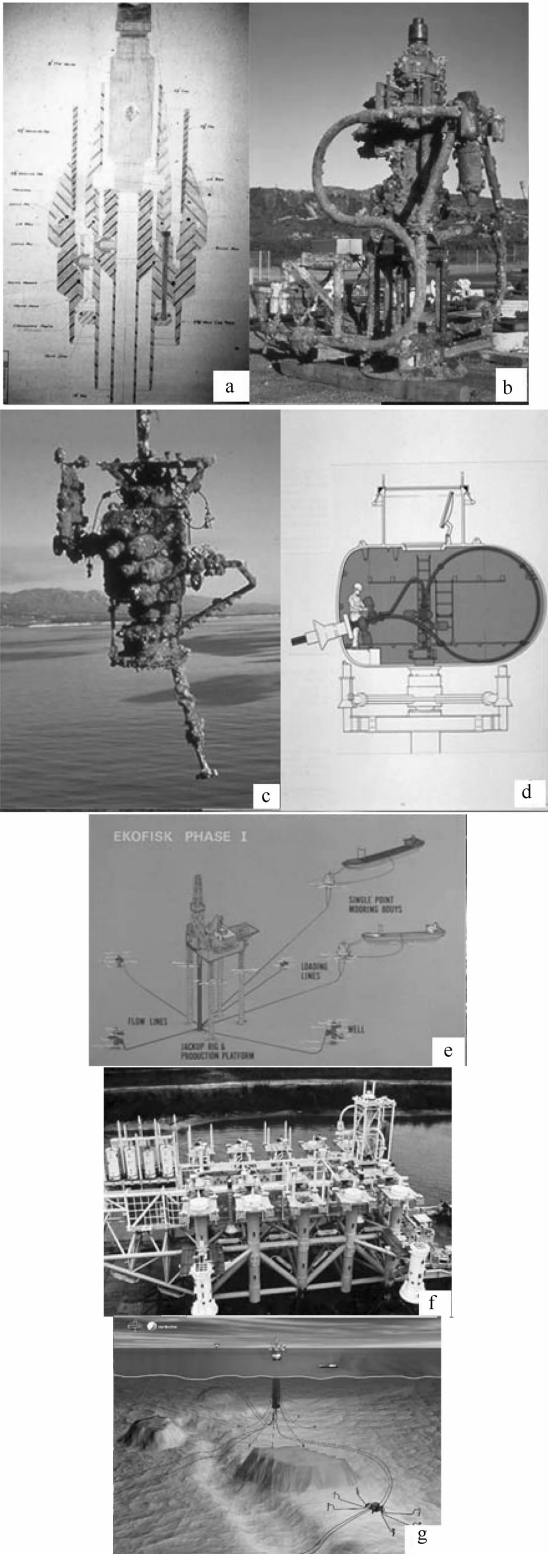


图 1 国外水下生产系统实例

国内对水下生产系统的研究起步较晚，现阶段还不具备开发水下生产系统自主知识产权，大部分水下生产系统的油田依

于国外技术进口，一定程度上影响了我国边际油田及深水油田的开发进程，因此水下生产系统的研究得到了国家的高度重视和各方广泛关注。下面对水下生产系统各部分逐一进行介绍。

2 水下生产系统的基础设备

2.1 水下采油树

采油树是水下生产系统的基本构件，最初被开发用于传统的钻油工程，但当石油开采转向深海领域，建立传统钻井平台毫无经济性可言时，采油树技术开始被应用于大洋深处。采油树又被称为十字树，X 型树和圣诞树，主要有套管头、油管头、采油（气）树本体 3 部分组成，是用于承托油管柱重量，密封油套管的环形空间，控制和调节油井生产，保证作业、测试及清蜡等日常生产管理的一种井口控制装置。

2.1.1 国内外背景

水下采油树的使用始于 1967 年<sup>[6]</sup>。FMC 公司作为世界上最大的水下完井设备供应商，迄今已为 250 个项目提供了超过 1 200 台水下采油树。Vtero Gray 公司在过去的近 10 年共安装了 150 台水下采油树。Cameron 公司和 Kvarner 公司也是世界生产水下采油树的主要厂家。各公司采油树类型如表 1 所示。

表 1 各公司采油树主要类型

| 公司名称       | 采油树名称                                          |
|------------|------------------------------------------------|
| FMC        | 双筒立式水下采油树（dual bore vertical subsea trees）     |
|            | 深水卧式水下采油树（deepwater HPHT subsea trees）         |
|            | 深水高温高压水下采油树（deepwater horizontal subsea trees） |
|            | 深水立式水下采油树（deepwater vertical subsea trees）     |
| Vtero Gray | 潜水员协助采油树（diver-assist tree）                    |
|            | 无潜水员协助引导式采油树（diverless guideline tree）         |
|            | 无潜水员协助非引导式采油树（diverless guidelineless tree）    |
|            | 卧式采油树（HT horizontal tree）                      |

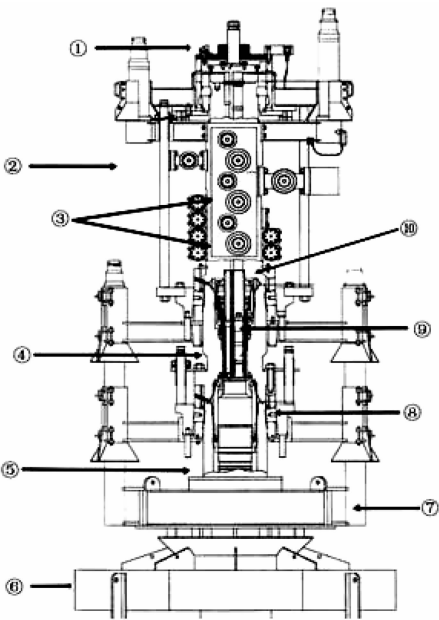
| 续表      |                                              |
|---------|----------------------------------------------|
| 公司名称    | 采油树名称                                        |
| Cameron | 直流电驱动水下采油树 (cameron DC subsea electric tree) |
|         | 双筒水下采油树 (modular dual bore tree)             |
|         | 组合卷轴采油树 (modular spool tree)                 |
|         | 泥线树 (mudline tree)                           |
| Kvarne  | 立式采油树 (conventional tree)                    |
|         | 卧式采油树 (HT horizontal tree)                   |
|         | 转换采油树系统 [crossover tree system (CTS)]        |

目前，国内还没有厂家生产水下采油树，流花 11-1 油田，惠州 21-1ss & 32-5 油田均采用 FMC 公司生产的卧式水下采油树，水深分别为 370 m、120 m 和 333 m。

2.1.2 结构形式

水下采油树的构造比地面采油树要复杂许多，这里仅介绍最普遍的立式和卧式采油树。

立式采油树又称垂直式或传统式（图 2）。



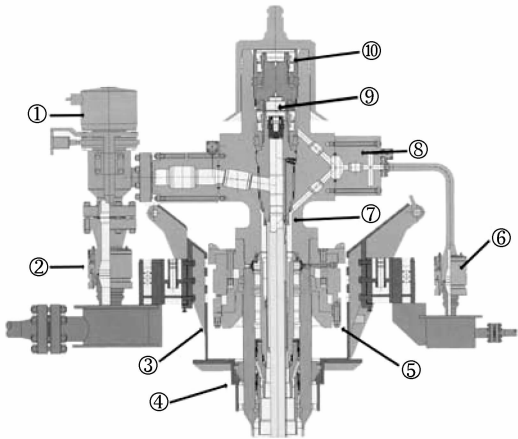
①采油树帽；②采油树框架；③采油树主阀模块；④油管四通；⑤井口；⑥井口盘；⑦生产导向基座；⑧井口连接器；⑨油管挂；⑩采油树连接器。

图 2 立式采油树结构

因其 PMV（生产主阀）、PWV（生产翼阀）和 SCSSV（地面控制井下安全阀）垂直排列而得名。其油管挂直接安装在井口里或油管里，

采油树安装好后不能进入井口内，没有钻孔通过采油树，移开采油树时不需要移开生产油管，安装时也无须进行水下检测，适用于油管尺寸较小、高压油气藏、井控复杂、开发周期内修井作业较少的水下油气田工程。

与立式采油树最大的区别是，卧式采油树的 PMV、PWV 在树体外水平排列（图 3），因而卧式采油树又称为水平采油树。其采油树安装在井口上，不移开采油树，将阀门转向一边（呈水平位置），就可直接进入井筒装置。卧式采油树还允许使用直径更大的产品管及联合装置，更易于后期维修，甚至可进行后期钻井作业，比立式采油树修井方便，节约时间，20 世纪 90 年代出现后一直得到广泛使用。



①生产油嘴；②出油管线接头；③采油树接头；④井口；⑤钻井导向基盘槽；⑥环状出油管接头；⑦采油树四通本体；⑧环形阀；⑨内部采油树帽；⑩岩屑帽。

图 3 卧式采油树结构

2.1.3 采油树的设计

进行采油树的设计时，不仅要考虑采油树的材料，所承载的工作压力和外载荷及泄露问题，还要满足规范<sup>[7]</sup>。涉及水深、水下腐蚀、井下接口、油管挂接口、阀门和油嘴的要求，出油管的连接，水下机器人接口，生产控制系统，压力/温度感应器及安装方法等设计时必须关注的问题。

2.2 管汇

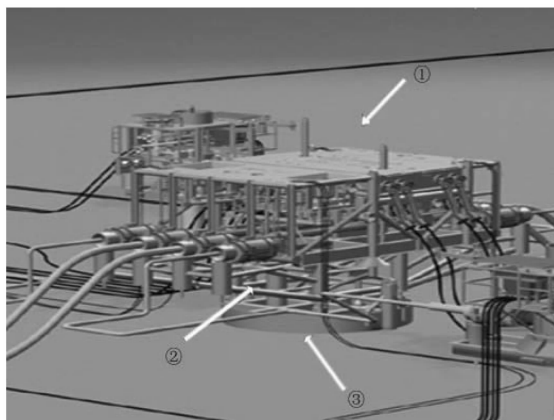
2.2.1 国外背景

起初水下生产系统只是单井，没有使用管汇，经过进一步发展，从单一的油井系带，菊

链式管汇, 丛式管汇到现在的集成基盘式管汇, 国外的管汇技术远较于国内成熟。Phillips 公司的“SeaStar”, BP 公司的“Troika”, Shell 公司的“Mensa”, Texaco 公司的“Gemini”, Shell 公司的“PoPeye”, 皆采用丛式管汇, 而 Exxon 公司的“Zinc”使用的则是集成基盘式管汇。管汇的主要生产厂商有: FMC、Vetco Gray、Aker Kvaerner、Cameron 等公司。

### 2.2.2 结构及类型

水下管汇是包括阀门、管线接头等配件由多根管道交汇而成的组合体, 安装于海底群井之间, 将各个油井的油气集中起来, 通过输油管线混合油流, 输送至上部采油平台。水下管汇和油井在结构上是完全独立的, 油井和出油管线通过跨接管与管汇相连。典型的水下管汇由管汇、管汇支撑结构、基础结构 3 部分组成(图 4)。其主要功能为: 集输产出液; 测量流量; 监测压力/温度; 保护出油管线并维持管线和阀门的正常工作。



①管汇; ②管汇支撑结构; ③基础结构。

图 4 典型管汇结构

目前主要应用于生产的是丛式井管汇和集成基盘式管汇两种类型。丛式井管汇可利用钻机或施工船进行安装, 并可以协同操作以缩短项目的周期, 其化零为整的思想简化了安装工艺, 节约了成本, 适用于生产井口位置相对分散的油气田, 国内外大多数水下生产系统管汇采用了此类型; 集成基盘式管汇可容纳更多的井口数, 有更大的汇集能力, 适用于油气藏集中、井口数目较多且分布密集的油气田。

### 2.2.3 设计及安装方法

要根据水下油气田的油气储量、海底地形、出油方式、环境载荷、海底基槽、钻井进度、安装方法及试运行结果等方面来挑选适合该项目的管汇方案。要综合考虑管汇的结构、基盘、管线、阀门控制系统, 管线连接系统以及材料的选择等问题, 设计水下管汇, 还要满足工艺要求, 以保证海上施工。管汇的安装方法有: 钻杆安装法, 直接下方法, 滑轮下方法, 悬垂下放法, 铅笔式浮标法和月池湿拖法。

## 2.3 脐带缆

### 2.3.1 国内外背景

脐带缆最早应用于 1961 年 Shell 公司在墨西哥湾建造的水下生产系统, 早期的脐带缆材料一般为热塑性软管, 随着水深的增加, 为满足强度和疲劳的设计要求, 90 年代初, 开始采用钢管脐带缆, 后续又出现高抗挤毁软管(HCR)及双相不锈钢等常用的脐带材料。目前 Nexans、Aker Kvaerner、Oceaneering Multiflex (OMUK)、Kvaerner Oil Products (KOP) 以及 DUCO 公司具有脐带缆设计制造的能力。现阶段, 最深的脐带缆用于墨西哥湾 Shell 公司开发的 Perdido 油田, 水深达 2 950 m。

我国南海的陆丰 22-1 油田所使用的脐带缆, 水深为 333 m, 与挪威合作安装完成。

### 2.3.2 结构类型

脐带缆是电缆、光缆、液压或化学药剂管的组合。其主要作用是将水面电力、液压液和信号以等传输给水下生产系统, 是上部设施遥控水下生产的必要通道。脐带缆按材料分为热塑性软管[图 5(a)]、钢管[图 5(b)]、高抗挤毁软管[图 5(c)]等, 按其构造分为电力控制、液压控制、复合电液控制等。

热塑性软管的使用历史较长, 现场施工经验较为丰富, 且费用低, 耐腐蚀, 易弯曲, 但管线热膨胀会严重影响响应时间, 液压的压力也要求更大; 钢管脐带缆技术日趋成熟, 材料种类繁多, 不易在深水中弯折, 响应时间明显优于热塑性软管, 但价格较高, 安装时易扭结, 焊接中也可能出现严重质量问题。

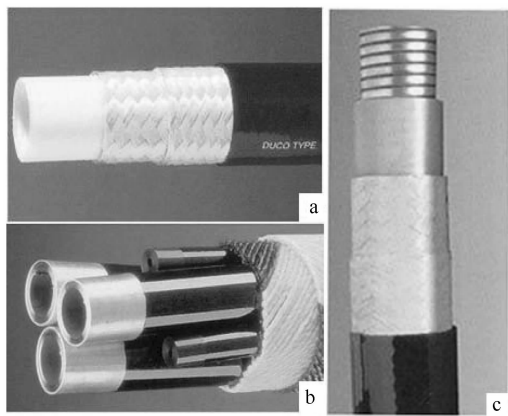


图 5 脐带缆

### 2.3.3 设计和安装

脐带缆的设计首先应满足液压、化学药剂注入、电力、控制信号等功能要求; 还需要满足拉伸、弯曲机疲劳等最大荷载的要求。脐带缆横截面的设计取决于管道的几何尺寸、材料的选择、液压液的压降和安装等因素。

对脐带缆进行铺设时, 需要专用的铺管船、定位船、滚筒、张紧器、斜槽和深水机器人等安装设备。因回接距离较大, 重量成为主要考虑因素, 所以安装船必须有足够的承载力。

## 2.4 其他部分

### 2.4.1 跨接管

跨接管是一个较短的管状连接单元, 用于连接出油管末端和水下设备上的连接点。跨接管分为刚性, 柔性。刚性跨接管主要有“M”“U”2 种形式, 适合采用垂直连接的方式, 常用于采油树与管汇, 管汇与管汇之间的连接; 柔性跨接管除可以连接水下终端外, 还可以作为分离船体的刚性隔离管和 FPSO 的隔离管<sup>[8]</sup>。跨接管的安装需要 ROV 或潜水员协助操作。

### 2.4.2 ROV

水下遥控工作机器人简称 ROV, 是一种具有智能功能的水下潜器。目前国内已引进不同型号近 30 台<sup>[9]</sup>。ROV 配有摄像头、多功能机械手、多种用途和功能的声学探测仪器及专业工具, 可以进行各种复杂的水下作业, 如水下安装连接、生产期检测、维修等, 广泛用于海洋石油行业, 为水下生产提供了技术支持。

## 3 对我国水下生产系统研发的借鉴意义

水下生产技术是开发深水油气田的重要手

段, 我国在“十一五”期间就将其列入“863”计划, “十二五”国家海洋科技发展规划纲要中指出, 要实现海洋开发技术自主化大发展。我国首座自主设计建造的 3 000 m 深水钻井平台“海洋石油 981”开启了深水油气开采之路, 与之相配套的水下生产系统的研发变得迫在眉睫。由于我国原油具有高含蜡、高凝点等特殊性质, 且水下生产系统设备处于低温及超高压环境, 因此研发技术难度大; 同时研发资本回收周期长, 融资较为困难, 抗技术风险能力不足, 与发达国家有一定差距。在阐述国外水下生产系统发展及现状的基础上, 笔者认为应加大与国外企业的合作, 汲取其先进科技理念及建造方式; 加大投入企业和高校研发水下生产系统的力度, 鼓励专利的授权及申请, 逐步实现自主设计建造, 为我国深海油气开发提供强有力的支持。

## 参考文献

- [1] 王玮, 孙丽萍, 白勇. 水下油气生产系统[J]. 中国海洋平台, 2009, 24(6): 41—45.
- [2] 王建文, 王春升, 杨思明. 水下生产系统开发模式和工程方案设计[J]. 中国造船, 2011, 52(suppl2): 27—33.
- [3] 张瑾, 谢毅. 深水水下管汇安装方法研究与进展[J]. 海洋工程, 2011, 29(1): 143—148.
- [4] 肖能. 水下生产系统脐带缆截面设计与分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2011: 1—4.
- [5] 孙晶晶, 刘培林, 段梦兰, 等. 深水脐带缆安装技术发展现状与趋势[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(12): 1—5.
- [6] 杨鼎元. 海上油气生产系统展望[J]. 海洋石油, 1998(3): 32—39.
- [7] 美国石油学会标准(API). 17D 石油天然气工业水下生产系统设计与操作: 水下井口和采油树.
- [8] 周灿丰, 焦向东, 曹静, 等. 水下跨接管连接器选型设计研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2011, 24(3): 75—78.
- [9] 黄明泉. 水下机器人 ROV 在海底管线检测中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(2): 52—57.