

潜油螺杆泵采油技术 及系统设计

王世杰 李 勤 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>



ISBN 7-5024-4097-6



9 787502 440978 >

ISBN 7-5024-4097-6

TE · 3 定价 38.00 元

销售分类建议: 石油工业/机械工程

潜油螺杆泵采油技术 及系统设计

王世杰 李 勤 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2006

内 容 提 要

潜油螺杆泵采油系统在开采高黏度、高含蜡、高含砂、高含气原油,在斜井、水平井、沼泽区块和海上平台作业中具有独特优势,其泵效高、同比采油量能耗低、泵检周期长、制造成本低、维护费用低等优点突出。自从1998年系统中的关键技术攻关取得突破后,这项采油技术在我国辽河、胜利、渤海等油田的应用一直在迅速扩大。书中总结了近年来关于该项技术的理论研究成果和实际应用经验,吸纳了前人的有关理论成果。内容包括潜油螺杆泵采油技术及装备概述;单螺杆泵的理论基础;螺杆泵采油供采协调与选型设计;减速器与联轴装置;螺杆泵转子转速制约因素综合分析;潜油螺杆泵采油作业监控技术;保护器;潜油电缆等。本书侧重于应用技术的介绍,其中部分内容是从未公开发表过的经验方法,对指导系统中关键机械部件的设计与制造、系统运行过程中的优化控制作用较大。

通过本书,从事采油工程的广大科技人员、石油机械设计制造人员以及一线设备安装、调试、管理和控制人员可从不同角度了解、掌握潜油螺杆泵采油技术。本书有助于解决实际应用中的技术问题,同时也可以供大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

潜油螺杆泵采油技术及系统设计/王世杰等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2006. 11

ISBN 7-5024-4097-6

I. 潜… II. 王… III. 深井潜油泵; 螺杆泵-机械采油-
设计 IV. TE355.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第117013号

出 版 人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 郭庚辰(电话:010-67152397) 美术编辑 李 心

责任校对 侯 璐 李文彦 责任印制 丁小晶

北京铁成印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2006年11月第1版,2006年11月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 13.75印张; 330千字; 207页; 1—2000册

38.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010) 64044283 传真:(010) 64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

潜油螺杆泵采油技术因其适宜于高黏度、高含砂量原油开采,适宜于斜井、水平井、沼泽地区以及海上平台采油作业,不存在断杆和管漏故障,同比采油量能耗低和设备制造成本低等优点,深受广大石油工作者的青睐。这项技术在俄罗斯、美国、加拿大、法国等国家早已广泛投入使用,在我国由于受到材料、设计水平和制造工艺水平的限制,起步较晚。1998年作者在辽河油田钻采工艺研究院的支持下开展了其中关键技术的攻关研究工作,不久在连接减速器输出轴和螺杆泵转子的联轴装置研究方面取得突破,而后又相继与胜利油田无杆泵公司、山东威马泵业有限公司、阜新石油工具厂、沈阳金田石油机械制造有限公司等企业合作,继续进行改进设计和生产试验,使177.8mm (7in) 套管和139.7mm (5½in) 套管中使用的潜油螺杆泵采油机组不断趋于完善。

在该项技术开发的同时,作者对其中所涉及的理论问题也进行了广泛的探讨和深入研究,其中涉及结构创新设计、优化设计、可靠性设计、系统运转的最优控制方法以及一些关键零部件的试验研究等内容,这些研究对该技术的应用无疑会起到促进作用。于是,我们将一些重要的理论与试验研究成果和一些有益的实践经验汇总成册。起初,我们将这些材料作为研究生培养的主要参考教材,但在使用过程中感到,该教材作为全面掌握潜油螺杆泵采油技术内容还不够系统。所以我们更为广泛地查阅了相关资料,力求使该书更加全面地反映潜油螺杆泵采油技术的理论与实践内容。

本书由王世杰、李勤编著。在本书的编写过程中,李福宝、张剑、夏延秋、孙书会、周健、刘杰等同志帮助做了大量工作。周作督高级工程师从专业角度对本书进行了全面审校。本书的出版得到辽宁省自然科学基金和辽宁省教育厅重大科技项目基金的支持。

本书比较系统地介绍了潜油螺杆泵采油技术的原理和现场应用的各个方面。详细介绍了近五年作者的研究成果。其中所包括的结构设计、工艺方法

和控制技术有很强的针对性和实用价值，对石油机械领域的广大科技工作者和各种潜油螺杆泵采油技术的应用人员会有一定的帮助，对大专院校的有关师生也有一定的参考价值。

在本书的编写过程中，为了保证其系统性，参考了大量的有关著作和论文，谨向有关作者表示感谢，并对许多曾提出过宝贵意见的同志，表示衷心感谢。潜油螺杆泵采油技术在我国尚属迅速发展的新技术，再加上作者的理论水平和实践经验的局限性，本书不足之处在所难免，恳请读者提出批评指正。

王世杰

2006年8月

目 录

第 1 章 潜油螺杆泵采油技术及装备概述	1
1.1 概述	1
1.2 潜油螺杆泵采油技术的研究与应用现状	2
1.2.1 国外潜油螺杆泵采油系统的开发研制	2
1.2.2 国外潜油螺杆泵采油系统的应用	4
1.2.3 我国潜油螺杆泵采油系统的研制与应用	7
1.3 潜油螺杆泵采油成套设备的组成及特征	8
1.3.1 潜油螺杆泵采油系统的组成	8
1.3.2 潜油螺杆泵采油系统的技术经济特征	9
1.3.3 ESPCP 系统要解决的关键技术问题	10
1.4 潜油螺杆泵采油技术的发展趋势及动向	12
1.4.1 传动系统的零部件结构设计	12
1.4.2 建立 ESPCP 系统的远程智能控制网	13
1.4.3 建立基于 PDMS 的 ESPCP 系统 CAD/CAPP 软件包	13
1.4.4 螺杆泵的结构设计与制造	13
1.4.5 定子橡胶的选择与配方设计	14
1.4.6 螺杆泵检测技术	15
1.4.7 确定合适的定转子之间的配合关系	15
1.4.8 金属定子、塑料转子螺杆泵	15
第 2 章 单螺杆泵的理论基础	16
2.1 单螺杆泵的工作原理	16
2.2 单螺杆泵的流量计算与基本参数确定	18
2.2.1 单螺杆泵的流量计算公式	18
2.2.2 单螺杆泵基本尺寸的确定	19
2.3 单螺杆泵定转子型线方程式	21
2.3.1 螺杆的轴向型线及其方程式	21
2.3.2 衬套的轴向型线及其方程式	22
2.4 单螺杆泵的运动学分析	25
2.4.1 单螺杆的自转和公转	25
2.4.2 单螺杆在衬套中的运动特点	26

2.5 单螺杆泵的能量损失与效率计算	28
2.5.1 容积损失	28
2.5.2 机械损失	28
2.6 单螺杆泵定转子尺寸最优配比	30
2.6.1 初始过盈最优值的确定	30
2.6.2 螺杆偏心距对其半径最优比值的确定	31
2.6.3 衬套导程对螺杆半径最优比值的确定	32
2.6.4 螺杆-衬套副长度的选择	32
2.7 单螺杆泵轴向力计算	34
2.7.1 G_c 的确定	34
2.7.2 G_f 的确定	35
2.7.3 G_p 的确定	36
第3章 螺杆泵采油供采协调与选型设计	40
3.1 螺杆泵的流体特性曲线	40
3.1.1 扭矩特性曲线	40
3.1.2 排量特性曲线	40
3.1.3 螺杆泵的功率与效率	41
3.2 油井渗流特性	42
3.2.1 单相流流入动态计算	42
3.2.2 油气两相渗流流入动态计算	44
3.2.3 油、气、水三相流体流入动态计算	48
3.2.4 水平井与定向井流入动态计算	50
3.3 垂直管流特性	54
3.3.1 气、液混合物在垂直管中的流动特性	54
3.3.2 计算气-液两相垂直管流压力梯度的摩擦损失系数法	55
3.3.3 混合液密度 $\bar{\rho}_m$ 、流速 $\bar{v}_m$ 及总质量 W_t 的计算方法	56
3.4 供采匹配协调	58
3.4.1 供采匹配协调原则	58
3.4.2 螺杆泵井的节点分析方法	59
3.5 螺杆泵的选择	61
3.5.1 螺杆泵的排量	61
3.5.2 螺杆泵的压头	62
3.5.3 影响螺杆泵排量、压头的其他因素	63
3.5.4 泵型选择及参数设计	65
3.5.5 配套抽油管的选择	68
第4章 潜油螺杆泵采油系统减速器设计	71
4.1 机械传动系的总成	71

4.1.1 传动系统运行环境及总体性能指标	71
4.1.2 引用标准	71
4.1.3 型式、等级及结构尺寸	72
4.1.4 机械传动装置总成的型号设计	73
4.2 减速器的选型与结构设计	73
4.2.1 潜油减速器的基本设计目标	73
4.2.2 结构形式选择	74
4.2.3 尺寸及速比系列化	74
4.3 行星齿轮传动的效率计算	76
4.3.1 行星齿轮传动效率的组成与计算依据	76
4.3.2 转化机构的效率计算	77
4.3.3 计算 2K-H 型行星齿轮传动效率的啮合功率法	79
4.3.4 2K-H 型行星齿轮传动效率的计算	80
4.4 行星齿轮传动的啮合计算	80
4.4.1 确定 2K-H 型行星齿轮传动各轮齿数应满足的条件	80
4.4.2 行星齿轮传动齿数的匹配方法	82
4.4.3 行星齿轮传动的角度变位	83
4.4.4 2K-H 型行星传动几何计算	83
4.5 行星齿轮传动的承载能力计算	85
4.5.1 2K-H 型行星齿轮传动的受力分析	85
4.5.2 计算方法与依据	85
4.5.3 行星传动齿轮主要尺寸的初步确定	87
4.5.4 齿面接触疲劳强度校核计算	88
4.5.5 轮齿弯曲疲劳强度校核计算	88
4.6 NGW 型行星减速器的可靠性优化设计	89
4.6.1 可靠性优化数学模型建立	89
4.6.2 计算机优化求解	93
4.7 潜油行星减速器生产试验	97
第 5 章 潜油螺杆泵采油系统联轴装置	98
5.1 联轴装置的创新设计	98
5.1.1 联轴装置的需求分析与功能	98
5.1.2 联轴装置总体结构设计	99
5.1.3 接口规范	100
5.1.4 联轴装置的技术特征分析	100
5.2 零齿差内啮合渐开线齿轮传动齿廓啮合过程的理论分析	102
5.2.1 啮合点沿内外齿轮齿廓的变化过程分析	103
5.2.2 齿廓实际工作段的确定	105
5.3 零齿差内啮合渐开线齿轮机构连续传动条件的分析	108

5.3.1 连续传动条件的确定与重合度的定义	108
5.3.2 单双齿啮合区段长的确定	110
5.4 渐开线零齿差内啮合齿轮机构传动效率的计算	112
5.4.1 内外齿轮齿面的滑移特征	113
5.4.2 传动效率计算	114
5.5 渐开线零齿差内啮合齿轮副强度的理论分析	116
5.5.1 齿廓接触疲劳强度的理论计算	116
5.5.2 齿根弯曲疲劳强度的理论计算	117
5.5.3 对切向变位影响系数的推导说明	119
5.6 零齿差内啮合齿轮副变位系数的选择	119
5.6.1 变位系数选择的基本原则	119
5.6.2 变位系数的选择过程	123
5.7 齿轮联轴节几何尺寸计算及强度校核举例	126
5.7.1 基本参数的确定	126
5.7.2 径向变位系数和切向变位系数的选择	126
5.7.3 外齿轮几何尺寸计算	126
5.7.4 内齿轮几何尺寸计算	127
5.7.5 考虑切向变位后内外齿轮齿厚计算	128
5.7.6 螺纹强度与筒体强度校核	128
第6章 螺杆泵转子转速制约因素综合分析	131
6.1 油井渗透率对螺杆泵转速的影响	131
6.1.1 井底压力信号的实时采集	131
6.1.2 油井动液面的环空测量法	131
6.2 容积效率与转速的关系及容积效率的关联影响因素	132
6.2.1 螺杆泵的容积效率和机械效率	132
6.2.2 泵的压力计算及泵两端的压差对效率的影响	133
6.2.3 油的温度和黏度对容积效率的综合影响	134
6.3 定子衬套的磨蚀情况与转速的关系	139
6.4 泵的结构参数与转速的关系	139
6.4.1 定子橡胶随温度的变化	140
6.4.2 定子橡胶随流体性质的变化	141
第7章 潜油螺杆泵采油作业监控技术	143
7.1 系统的控制需求	143
7.2 控制策略与实施	144
7.2.1 宝塔式控制策略	144
7.2.2 采油系统的软启动	144
7.2.3 供采平衡状态下电机输入频率的设计准则	145

7.2.4 控制方式	145
7.2.5 控制过程	148
7.2.6 数据处理	150
7.3 控制系统的硬件平台与变频调速	151
7.3.1 调速原理与调速方式的确定	151
7.3.2 变频调速对电动机的要求	152
7.3.3 变频器的容量	152
7.3.4 负功率处理	153
7.3.5 变频器的选型	153
7.4 信号采集	155
7.4.1 井下传感器	155
7.4.2 井下环空动液面的测量	158
7.5 信号处理与通信控制	163
7.5.1 信号的传递过程	163
7.5.2 信号的转换	164
7.5.3 基于 Windows98 的串行通信控制模块	165
7.5.4 自校正 PID 调节器的设计与实现	167
第 8 章 保护器	169
8.1 保护器的作用及种类	169
8.1.1 保护器的作用	169
8.1.2 保护器的种类	170
8.2 保护器的结构及原理	170
8.2.1 保护器的结构及原理	170
8.2.2 沉淀式保护器	171
8.2.3 胶囊式保护器	172
8.2.4 保护器呼吸量的计算	173
8.3 保护器的机械密封	173
8.3.1 机械密封的基本结构和作用原理	174
8.3.2 机械密封的特点	175
8.3.3 机械密封的磨损形式	175
8.3.4 机械密封的性能参数	176
8.4 保护器的应用	180
8.4.1 保护器的使用效果	180
8.4.2 常见故障及处理方法	180
8.5 保护器的组装、检修及试验	181
8.5.1 保护器的组装	181
8.5.2 保护器的拆检	181
8.5.3 保护器的试验	181

第 9 章 潜油电缆	182
9.1 潜油电缆的结构特点和潜油电缆材料	182
9.1.1 潜油电缆的结构特点	182
9.1.2 潜油电缆的材料	183
9.2 潜油电缆的技术参数及测试	185
9.2.1 潜油电缆的技术参数	185
9.2.2 潜油电缆技术参数的测试	188
9.3 潜油电缆的连接	194
9.3.1 潜油电缆的连接材料	194
9.3.2 潜油电缆的连接方法	196
9.4 潜油电缆头的结构	197
9.4.1 插入式电缆头	197
9.4.2 缠绕式电缆头	198
9.4.3 电缆头的规格及机组配套	198
9.5 潜油电缆头的性能指标及测试	199
9.5.1 潜油电缆头的电气性能指标	199
9.5.2 潜油电缆头的各项性能指标测试	199
9.6 潜油电缆的选择	200
9.6.1 电缆耐温等级和电缆载流量的选择	200
9.6.2 电缆降压、损失功率和经济性的选择	200
9.7 潜油电缆的故障及检测	201
9.7.1 潜油电缆的故障原因	201
9.7.2 潜油电缆的故障检测	202
参考文献	205

第 1 章 潜油螺杆泵采油技术 及装备概述

1.1 概述

螺杆泵的英文全称是 Progressing Cavity Pump, 即 PC 泵, 是 20 世纪 20 年代中期由法国科学家勒内·穆瓦诺 (Rene Moineau) 发明的。穆瓦诺的初始想法是设计一种旋转压缩机, 在设计过程中创造出这种旋转机械, 通过其转子与定子的相对运动产生一系列进动式型腔, 改变流体压力, 因此称它为进动式压缩机或型腔泵。

1930 年 5 月, 穆瓦诺原理获得专利权, 不久便有三家公司: 法国 PCM 泵业公司、英国 Moyno 泵业有限责任公司以及美国 Kois & Myers 公司生产螺杆泵。随后几年内, 其他一些小公司也很快制造出基于穆瓦诺原理的其他副产品。申请专利后, 穆瓦诺原理在许多领域得到了广泛应用。螺杆泵已在化学、煤炭、机械制造、造纸、纺织、烟草、污水处理等涉及固态或黏稠液态物料输送的行业内发挥着重要作用, 早期应用在石油化工领域, 作为地面传输泵使用的历史已超过 50 年。

20 世纪 50 年代中期, 在马达设计中开始应用穆瓦诺原理, 这就是螺杆泵功能的逆向使用, 液体在压力作用下强行通过螺杆泵时, 将迫使螺杆泵转子转动。这项技术应用于钻井工业中, 用钻井泥浆或其他流体驱动螺杆泵转子, 它变成了钻井机械的原动机, 即成为马达。

20 世纪 50 年代末期, 螺杆泵在石油工业中开始被用作人工举升设备。Kois & Myers 公司率先在石油工业中把穆瓦诺原理应用于人工举升, 他们成为首批采油螺杆泵制造商, 把螺杆泵作为一种新型的人工举升设备推向市场。在 90 年代初期, 得到广泛应用。

螺杆泵作为人工举升设备, 早期是以地面动力驱动为主, 螺杆泵的定、转子分别接在油管 and 抽油杆的末端, 定子与油管相接, 转子与抽油杆相接, 通过地面驱动装置使抽油杆带动转子旋转, 这是由抽油杆传递动力举升井内流体。后来, 考虑到节能、节约原材料以及管杆偏磨所导致的断杆或管漏等故障问题, 同时伴随着电机技术和机械传动技术的突破, 一种电机倒置于井下, 通过减速器直接带动螺杆泵转子旋转的石油人工举升技术诞生了, 人们称之为潜油螺杆泵采油技术 (Electrical Submersible-motor-driven Progressive Cavity Pumping Technology-ESPCP)。这种技术取消了抽油杆, 形成了很多优势, 甚至在石油开采的某些特殊领域成为不可替代的技术。在后续章节对此将详细讨论。

20 世纪 90 年代, 螺杆泵的制造工艺研究与应用发展得更加迅速。国内已经有 30 余生产厂家, 许多技术难关已经攻破, 许多技术规范已经制定出来, 每年都有一些新工艺技术进入应用领域。例如沈阳工业大学提出的螺杆无瞬心包络铣削技术及其研制的数控铣削加工设备打破了国际垄断, 开发出的潜油螺杆泵采油系统已成功地投入生产运行。

1.2 潜油螺杆泵采油技术的研究与应用现状

1.2.1 国外潜油螺杆泵采油系统的开发研制

螺杆泵在高黏度稠油 ($5000\text{mPa}\cdot\text{s}$)、大油气比油 ($700\text{m}^3/\text{t}$) 和含砂油 (体积分数不小于 2.5%) 开采作业中体现出了较好的性能和效益, 前苏联在姆哈诺夫斯克油田使用时, 油气比高达 $400\text{m}^3/\text{t}$ 的条件下, 无故障工作长达 477 天, 泵效达 70%。但是抽油杆和套管的偏磨问题使机组的下井深度受到限制, 机组的运行效率也会因为抽油杆与流体之间的摩擦、管杆之间固体颗粒的沉积以及抽油杆扭曲变形而下降。为克服这一不利因素, 前苏联、美国、法国、加拿大等国家的一些公司在 20 世纪 80 年代初期开始研制电动潜油螺杆泵采油系统, 潜油电机和电缆都与常规电潜离心泵机组中的一样, 不同的是用螺杆泵替代了离心泵, 并且在动力源与泵之间介入了机械传动环节, 起调速及改变运动形式之功用。

1.2.1.1 美国 Reda 公司的潜油螺杆泵采油技术

据 1994 年、1995 年美国《世界石油》报道, Reda 公司 1994 年与加拿大一家公司合作开发潜油螺杆泵采油系统。

该装置包括一台潜油电机、保护器、挠性传动部件和螺杆泵。电机是 Reda540 系列, 功率为 29.83kW (40hp), 四极, 同步转速为 $1800\text{r}/\text{min}$, 对应的二极电机同步转速为 $3600\text{r}/\text{min}$ 。挠性传动使电机由 $1700\text{r}/\text{min}$ 的输入转速降低到 $106\text{r}/\text{min}$ (减速比为 16:1) 或 $425\text{r}/\text{min}$ (减速比为 4:1), 把电机的定轴转动调整为螺杆泵转子的偏心转动。保护器为标准的三腔保护器, 上腔室充满齿轮油, 另外两个则充满电机油。保护器可提供可靠的密封, 也可为齿轮减速器和潜油电机提供压力平衡和润滑。齿轮减速器有额定止推力为 266.9kN (60000lbf) 的下止推轴承承受 PC 泵产生的推力和额定止推力为 66.72kN (15000lbf) 的上止推轴承, 它允许 PC 泵反转但防止转子从定子中脱出, 这一特点在泵被砂堵时可用来清砂。齿轮减速器在挠性联轴器上有两个像滤砂网一样的密封, 有助于防止井液进入减速器。

最近该公司又开发出一种外径尺寸为 106.68mm (4.2in)、额定功率为 37.29kW (50hp) 的减速器, 能够在 139.7mm ($5\frac{1}{2}\text{in}$) 套管内将井下电机和螺杆泵连接起来, 传动比为 4:1。使用四极电机时, 提供 $425\text{r}/\text{min}$ 的输出转速, 并通过一台变频装置实现地面控制, 即进行软启动和速度微调。目前, 有 20 多套设备在加拿大的油井中运行。

应用中他们体会到这种技术的优点是:

- (1) 消除了抽油杆与油管之间的磨损;
- (2) 可用于斜井和水平井采油;
- (3) 改善了破坏严重的斜井工作状况;
- (4) 可通过变速驱动、调速, 以适应不同的井下条件;
- (5) 取消了抽油杆柱, 消除了抽油杆与流体之间的伴生摩擦损失;
- (6) 无需地面维修保养。

1.2.1.2 美国 Centrilift-Hughes 公司的潜油螺杆泵采油技术

美国 Centrilift-Hughes 公司于 1992 年开始设计 ESPCP 系统。该公司与一家齿轮公司合作研制了传动比为 9:1 的齿轮减速器,在电机和保护器上采用挠性轴,成功地进行了寿命达 9 个月的生产试验,应用在含砂、高 CO_2 、中等 H_2S 、比重为 14°API、气液比达 1000 的环境中,目前已形成系列产品。可以根据不同井况,选择不同技术参数的部件。更重要的是采用氧化锆陶瓷轴承,可以承受由螺杆泵反馈的额定轴向推力达 66.72kN (15000lbf)。

1.2.1.3 俄罗斯潜油螺杆泵采油技术

原苏联 1973 年在地面驱动螺杆泵采油系统投入批量运行的同时,又研制了排量大、扬程高,适宜于深井举升的单螺杆泵采油系统,目前已发展为单头、双头和三头螺杆三种类型产品。排量范围为 $16\sim 200\text{m}^3/\text{d}$,实际最大排量为 $250\text{m}^3/\text{d}$,举升高度范围为 900~1200m,实际使用最高达 1400 m。

3BHT 5A 型井下电驱动单螺杆泵采油系统,共有四种规格,如表 1-1 所示。排量为 $16\sim 250\text{m}^3/\text{d}$,举升高度为 900~1200m,电机工作转速为 2800~3000r/min,最高泵效达 70%,一般泵检周期为 1 年,实际最高可达 16 个月。

表 1-1 俄罗斯潜油螺杆泵采油系统系列

型 号	3BHT 5A- 16-1200	3BHT 5A- 25-1000	3BHT 5A- 100-1000	3BHT 5A- 200-900
排量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	16	25	100	200
扬程/m	1200	1000	1000	900
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	500	500	500	500
推荐排量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	16~20	25~36	100~150	200~250
推荐扬程/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	600~1200	400~1000	200~1000	250~900
电机功率/kW	5.5	5.5	22	32

俄罗斯使用潜油螺杆泵采油系统的经验表明,在低动液面、高油气比油井中举升石油,螺杆泵采油系统要比离心泵的排量提高 2~5 倍。使用中的主要问题是定子橡胶容易损坏、轴承损坏、偏心或铰链联轴节不可靠等。

最新报道,俄罗斯莫斯科无杆泵设计院联合体于 1998 年又研制成功了新型并联潜油螺杆泵采油系统,其组合方式如图 1-1 所示。置于最下面的电动机与上面第一个右旋螺杆泵相连接,再经偏心联轴节与上方第二个左旋螺杆泵相连接,两个并联螺杆泵按相反方向泵送井液,其最重要的技术特征是两个定子和各自转子工作副的轴向力相互抵消平衡。这种系统可适宜于最小油管内径为 121.7mm 的油井,目前有 1600 多台(套)在俄罗斯各油田进行抽油作业。

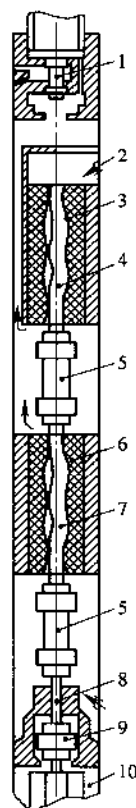


图 1-1 并联潜油螺杆泵采油系统结构简图

- 1—安全阀；2—滤网；3—上部螺杆泵衬套；4—上部螺杆泵螺杆；5—偏心联轴节；6—下部螺杆泵衬套；7—下部螺杆泵螺杆；8—短轴；9—启动联轴节；10—保护器

1.2.1.4 加拿大 Corod 公司的潜油螺杆泵采油系统

加拿大 Corod 公司除了生产地面驱动螺杆泵采油系统外,还生产两种井下驱动方式的螺杆泵采油系统:

(1) 井下电机驱动螺杆泵采油系统采用可变转速的电动机驱动,根据油井工况条件变化以及采油的需要,可随时调节油井产量,使用与调节相当方便。

(2) 井下液压驱动螺杆泵采油系统采用电动机驱动液压泵,产生一定压力和排量的液体,通过管线输送到井下液压马达,再驱动螺杆泵转子旋转举升井液。根据油井工况条件变化以及采油的需要,也可以随时调节油井产量,使用与调节方便。

1.2.2 国外潜油螺杆泵采油系统的应用

1.2.2.1 潜油螺杆泵采油系统在长滩油田的应用

从1993年11月开始,长滩油田陆续安装了13套 ESPCP 机组,表1-2列举了油层及完井性能。这13套机组分别下入10口不同的油井,其中有固体含量高于7%的,也有硫酸钡结垢问题严重的。运行寿命从0~407天不等,安装数据见表1-3。通过检查9套已停机的机组发现:

(1) 当泵送受阻时导致齿轮减速器出现机械故障或油管泄漏,可通过改进地面溢流阀提高其可靠性,并消除井下油管泄漏。

表 1-2 油层及完井性能

油 层	RANGER	TERMINAL	UPFORD
区 域	海上	海上	海上
生产井号	439	128	44
岩性(胶结性砂岩)	非	弱	强
油井产液量/ m^3	31.8~874.4	17.5~556.5	6.4~238.5
泵吸入口压力/MPa	0.7~5.6	0.7~5.98	0.7~4.2
垂直深度/m	640~975	549~1280	1250~2164
原油 API 度(比重)	15 (0.9659)	20 (0.934)	28 (0.8871)
气液比/ $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$	1.96	6.23	14.2
平均储层压力/MPa	7.0	7.7	9.8
平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	54.44	71.11	98.89
平均含水/%	94.0	82.5	80.0
平均黏度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	80	15	5
结垢(轻,重)	$\text{CaCO}_3 \text{BaSO}_4$	$\text{CaCO}_3 \text{BaSO}_4$	CaCO_3
固体颗粒/%	0~5	0~5	0~1
二氧化碳	$(0 \sim 4000) \times 10^{-6}$	$(0 \sim 4000) \times 10^{-6}$	$(0 \sim 2000) \times 10^{-6}$
硫化氢	$(0 \sim 4000) \times 10^{-6}$	$(0 \sim 4000) \times 10^{-6}$	$(0 \sim 2000) \times 10^{-6}$
乳 化	有	有	有
套管尺寸/mm (in)	219.1 (8 $\frac{5}{8}$)	219.1 (8 $\frac{5}{8}$)	244.5 (9 $\frac{5}{8}$)
衬管尺寸/mm (in)	168.3 (6 $\frac{3}{4}$)	168.3 (6 $\frac{3}{4}$)	177.8 (7)
完 井	砾石充填	砾石充填	割缝衬管
油管尺寸/mm (in)	73.0 (2 $\frac{3}{4}$)	73.0 (2 $\frac{3}{4}$)	73.0 (2 $\frac{3}{4}$)

表 1-3 ESPCP 安装数据

序号	油井	电机功率 /kW (hp)	泵级	减速比	产液 /m ³ · d ⁻¹	产油 /m ³ · d ⁻¹	API 度	固体含量 /%	最大角度 / (°)	寿命/d
1	A314	29.83 (40)	18	4 : 1			17.2		90	0
2	A314	29.83 (40)	18	4 : 1	158.9	7.9	17.2	2~4	90	37
3	A406	22.37 (30)	18	9 : 1	31.8	7.9	16.0	无	11	109
4	A567	29.83 (40)	22	4 : 1	31.8	10.3	13.0	0~7	94	141
5	A567	29.83 (40)	22	4 : 1	31.8	10.3	13.0	0~7	94	381
6	C340	29.83 (40)	18	9 : 1	47.7	3.2	23.0	有	77	248
7	C531	29.83 (40)	14	4 : 1	127.2	4.8	15.1	无	74	22
8	C652	29.83 (40)	18	4 : 1	158.9	13.5	19.5	无	59	41
9	D756	29.83 (40)	18	9 : 1	28.6	2.4	16.0	无	35	339
10	D803	29.83 (40)	60	4 : 1	27.0	2.8	17.0	无	48	407
11	J127	14.91 (20)	18	4 : 1	31.8	1.6	13.1	无	50	16
12	J127	14.91 (20)	18	4 : 1	31.8	1.6	13.1	无	50	10
13	J342	29.83 (40)	18	4 : 1	28.6	4.0	12.0	无	94	208

(2) 由于机组反复运行造成的电气故障, 可通过改变 PC 泵选择程序、用变速驱动装置和监测器监测吸入口压力来加以改进。

用 ESPCP 已成功地解决了因磨蚀和结垢造成的 ESP 磨损和堵塞, 在存在这些问题的油井中, ESPCP 将成为一种主要的人工举升方法。在长滩油田的普通油井中, 虽然 ESPCP 比 ESP 的机组费用高出 90%, 但这些费用主要是用于泵和电机、齿轮减速器和压力监测器。

在运行费用方面, ESPCP 比 ESP 的平均电耗低 19%, 按照这个初步统计的结果, 在产量为 800bbl/d、垂直深度为 883.9m 的油井中, 用 ESPCP 每天可节省电费 7.95 美元 (每千瓦时省电 0.04 美元)。

对于 ESPCP 机组, 要想在经济效益上与 ESP 竞争, 必须充分延长其运行寿命, 减少功率损耗以弥补投资差额。因此只有在 ESP 不能运行或运行寿命小于 400 天的油井中, ESPCP 才能具有更高的经济效益。当然还要减少其初始投资以缩小与 ESP 的差距, 甚至比 ESP 更低。

1.2.2.2 潜油螺杆泵采油系统在 Cactus Lake 地区的应用

(1) 在加拿大 Cactus Lake 地区的 McLaren 砂岩带开采的一口稠油水平井中, 油层特征是: 垂直井深 775m, 产油层净厚 12~14m, 孔隙度 33%, 渗透率超过 5D, 原油重度 11.5°API, 密度为 0.9895g/cm³, 黏度 10 000mPa · s, 井底温度 25℃, 含砂量 0.1%~5.0%, 含水大于 75%。选择这口井的原因是一直存在开采水平井所普遍存在的问题, 如抽油杆断裂、油管泄漏、砂粒沉积等。

油井用 177.8mm (7in) 套管完井, 开始使用有杆泵开采。1994 年 11 月 29 日, 在 90°造斜点 (水平段) 安装 ESPCP 机组, 其中包括 540 系列 44.74kW (60hp) 的四极电机、减速比 4 : 1 的齿轮减速器和 BMW83-800PC 泵, 机组运行速度 425r/min。直到 1996