

电潜泵采油系统 优化设计技术

DIANQIANBENG CAIYOU XITONG YOUHUA SHEJI JISHU

周德胜 © 著

石油工业出版社

电潜泵采油系统优化设计技术

周德胜 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书从石油工程师应用电潜泵采油的角度,以电潜泵采油系统优化设计为主线,以提高电潜泵采油系统寿命、系统效率和单井产量为目的,详细介绍了电潜泵采油系统相关基础理论、电潜泵机组特性、电潜泵系统设计计算原理、电潜泵采油科学设计计算理论。通过具体实例的设计计算,演示了国际上最新的工程和科学设计计算方法。

本书可作为从事电潜泵采油研究与应用的石油科技人员、教学人员以及生产厂家工程技术人员的参考资料,也可供广大采油科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电潜泵采油系统优化设计技术/周德胜著. —北京:石油工业出版社,2017.6

ISBN 978-7-5183-1942-8

I. ①电… II. ①周… III. ①电磁泵-采油方法 IV. ①TE35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 135469 号

出版发行:石油工业出版社

(北京朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64523579 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:12.25

字数:310 千字

定价:59.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

随着我国石油工业的发展和油田开发的需要,为了提高采油速度和开采量,需要采用先进的采油技术作为支撑。电潜泵采油是为经济有效地开采地下石油而逐渐发展起来的一种人工采油方式,具有排量扬程范围大、功率大、生产压差大、适应性强、地面工艺流程简单、机组工作寿命长、管理方便和经济效益显著等特点,得到了国内外采油企业的一致认可。

自 1928 年第一台电潜泵投入使用以来,随着电潜泵采油系统的主要部件电潜泵、电动机、保护器、电缆和井下气液分离器等生产技术的逐步提高,以及电潜泵采油系统优化设计技术的发展,电潜泵采油的系统效率、系统寿命、单井产量都得到了重大突破,电潜泵采油得到了越来越广泛的应用,并于 2008 年在全球新增采油系统投资中超过了游梁泵采油系统。电潜泵采油系统在下泵深度、小排量、高温、高黏度、高含砂、高含气、高含硫等适用范围方面也取得了很大进展。目前,电潜泵系统不仅广泛应用于油井采油,也应用于气井排液采气、水井采水注水、地热开采等领域。

电潜泵采油系统优化设计技术与机组各主要生产部件的生产质量共同决定了电潜泵采油的适用范围、系统效率和工作寿命。然而,由于电潜泵采油系统优化设计技术涉及机械、电工、传热、流体、油藏、采油等相关知识领域,给油田采油工程师和生产制造工程师都造成了一定困惑。

本人长期从事采油气领域科学研究、现场应用与教学工作。该书从油田采油工程师角度出发探讨了如何应用电潜泵采油系统各主要生产部件的现有产品,实现电潜泵采油系统优化设计,提高现有电潜泵采油时的系统效率和寿命,从而实现增加单井产量的目的。

本书较详细地讨论了目前国际上电潜泵采油系统优化设计技术中最新的认识,主要介绍了工程设计计算中应用较广泛的工程设计计算方法,讨论了其不足与可能造成的问题,介绍了较复杂的科学设计计算方法,并对两种方法进行了对比分析和讨论。本书还从实现这两种方法的采油相关基础理论出发,讨论了电潜泵采油主要设备特性,电潜泵采油系统设计计算原理,电潜泵采油系统科学设计计算难点,最后采用具体现场实例,详细介绍了工程和科学设计计算方法。

本书共分为六章:

第一章绪论,主要介绍了电潜泵的发展历史,国内外电潜泵的发展现状,电潜泵机组的工作原理与特点,并简要介绍了电潜泵采油系统。

第二章电潜泵采油系统相关基础理论,主要介绍了原油物性、天然气物性、地层水物性、流入动态和井筒两相流等与电潜泵采油相关的基础理论。

第三章电潜泵采油设备基础知识,主要介绍了电潜泵、电动机、保护器、电缆、井下气体分离器等电潜泵采油系统主要设备的性能和特点。

第四章电潜泵采油系统设计计算原理,在阐明动液面及下泵深度、总动压头、电潜泵选择、泵级数和转速这些重要参数基础上,详细介绍了电潜泵采油系统主要设备的工作原理与工程设计计算方法。这些方法也是科学设计计算方法的基础。

第五章电潜泵采油系统科学设计计算难点。井底流动压力、气体对电潜泵特性影响、黏度对电潜泵特性影响、电动机发热为电潜泵优化设计计算的重要参数,其准确性对电潜泵系统设计、设备选择、系统效率以及系统寿命影响较大。然而,由于这些重要参数的确定涉及较复杂的理论和大量的科学计算,在工程设计计算中往往被简化或者忽略。本章将详细介绍这些重要参数的理论和计算方法。

第六章电潜泵采油系统设计计算方法,综合应用从第二章到第五章所介绍的基本原理、公式、方法,以实际电潜泵采油实例形式,详细介绍应用工程和科学设计计算方法完成电潜泵采油系统的优化设计。

本书引用了国内外部分电潜泵生产厂家的主要产品及其特性介绍,查阅了国内外相关文献、资料和研究成果,在此表示感谢。本书在编写过程中得到了西安石油大学领导、专家的支持和帮助,得到了西安石油大学优秀学术著作出版基金、国家自然科学基金项目“气井气体携液的多液滴理论研究”(51074124)和陕西省重大科学技术难题攻关项目“陆相页岩气储层压裂改造工艺技术攻关”(2012KTZB03-03-03-02)的资助,在此一并表示感谢。特别需要指出的是我的研究生张争、李鸣、师煜涵参与了部分资料的收集与文字整理、编排等大量工作,此外研究生冯满云、周媛、惠峰、刘安邦、赵超能、彭娇、贺沛、郑鹏、卫海涛、王博学、石豫、聂玲、宋鹏举、陈鹏等也对本书的成稿做出过贡献,对他们付出的辛勤努力表示真诚的感谢!

本书既可作为从事电潜泵采油研究与应用的石油科技人员、教学人员和石油工程领域学生的参考资料,又可供电潜泵生产厂家工程技术人员参考。本书关于电动机、保护器、气液分离器、电缆的介绍和设计计算方法也可供采用井下电动机驱动的其他井下泵(如螺杆泵)采油相关技术人员参考。此外,本书讲述的采油原理、大量现场实际应用公式、各公式的实例计算对比与讨论,也可供石油科技人员、广大师生参考。

由于水平有限,书中不足之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编者

2017年1月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 电潜泵发展史及现状	(1)
第二节 电潜泵机组的工作原理及特点	(2)
第三节 电潜泵采油系统概述	(3)
参考文献	(7)
第二章 电潜泵采油系统相关基础理论	(9)
第一节 原油物性	(9)
第二节 天然气物性	(29)
第三节 地层水物性	(40)
第四节 流入动态	(42)
第五节 井筒单相流	(50)
第六节 井筒两相流	(54)
第七节 井筒两相流计算方法	(59)
参考文献	(63)
第三章 电潜泵采油设备基础知识	(66)
第一节 电潜泵特性	(66)
第二节 电动机特性	(77)
第三节 保护器特性	(84)
第四节 电缆特性	(87)
第五节 井下气体分离器特性	(91)
参考文献	(92)
第四章 电潜泵采油系统设计计算原理	(93)
第一节 电潜泵采油井性能分析	(93)
第二节 泵吸入口压力	(98)
第三节 自由气体与总动压头	(103)
第四节 电潜泵设计计算	(109)
第五节 电动机设计计算	(114)
第六节 保护器设计计算	(116)
第七节 电缆设计计算	(119)
第八节 气体分离器设计计算	(121)

第九节 地面设备设计计算	(122)
参考文献	(124)
第五章 电潜泵采油系统科学设计计算难点	(125)
第一节 井底流动压力计算	(125)
第二节 黏度对电潜泵特性的影响	(130)
第三节 气体对电潜泵特性的影响	(137)
第四节 电动机发热计算	(153)
参考文献	(158)
第六章 电潜泵采油系统设计计算方法	(160)
第一节 工程设计计算方法	(160)
第二节 科学设计计算方法	(174)
参考文献	(188)

第一章 绪 论

随着社会的快速发展,全球对石油和天然气的需求量与日俱增。然而在当今开采技术下,可采出的原油越来越少,原油的生产难度越来越大,特别是在大部分油田进入生产中后期之后,面临的问题越来越多。诸如,油藏的渗透率降低、油藏能量衰减加快,并且出现了高含水、高含砂、能耗大和泵效低等问题,这就对油气的开采技术提出了更高要求。国内外绝大多数油田依靠的是机械采油,而 80% 的机械采油方式都是有杆泵采油。电潜泵以其独特的优势可以适应多种油气田,从而提高油气田的开采效率,满足全球对石油天然气资源的需求。

第一节 电潜泵发展史及现状

一、国内外电潜泵的发展史

(1)1923 年,白俄罗斯人奥拓纳夫在世界上首次提出电潜泵采油,并在美国洛杉矶制造出第一台电潜泵。

(2)1930 年,奥拓纳夫在美国创建了 Reda 公司。

(3)1940 年,苏联国家石油机械设计院深水电动机局石油工业组研制了苏联第一台电潜泵,开始用于油田。

(4)1970 年,美国形成的规模较大的电潜泵专业生产厂家为 Reda 公司、Centrilift 公司、Woodgroup 公司、ODI 公司。

(5)1978 年,我国开始生产电潜泵。

(6)2010 年,美国电潜泵专业生产厂家发展为 Reda 公司、Centrilift 公司、Woodgroup 公司、Weatherword 公司。

(7)2010 年,俄罗斯电潜泵专业生产厂家发展为 Alnas 公司、Borets 公司、Novomet 公司。

(8)2010 年,我国电潜泵专业生产厂已发展到近 10 家,产品出口世界各地。

二、国内外电潜泵新技术

随着电潜泵应用的日益广泛,油田现场对电潜泵无论在数量上,还是在性能和质量上,都提出了越来越高的要求。此外,由于电潜泵适用范围的扩大(如高温井、高气油比井、高含砂井、腐蚀井、水平井、深井),对电潜泵在特殊环境下的性能提出了更高的要求。面对这些问题,国内外电潜泵制造厂不断创新改造,已成功地开发出了一系列新产品和新技术。

(1)大排量高压注水泵。排量:5000m³/d;泵出口压力:27.6MPa;制造厂:Reda。

(2)水平井电潜泵。美国 ODI 公司制造了一种可以通过 12°/30m(中曲率半径)弯曲段的专用装置,并在得克萨斯州的 2 口 12°/30m 水平井中成功应用。

(3)防砂泵。美国 Reda 和 Centrilift 公司首先将工业陶瓷应用于防砂泵轴承、叶轮、减磨

垫制造中,并采用有较高耐磨性能的导轮,使其防砂效果有了明显提高。

(4)全压缩泵。为了防止泵叶轮浮动,美国 Reda、Centrilift 和 ESP 公司均设计生产了采用固定式叶轮结构的全压缩泵,可有效防止叶导轮相摩擦。

(5)防腐电潜泵。针对含有腐蚀性介质的油井,美国的一些电潜泵制造厂采用了具有优良抗腐蚀性能的材料和先进的防腐工艺,开发制造了有效抗腐蚀的电潜泵,使电潜泵在腐蚀井中的运转寿命极大提高。

(6)耐高温电潜泵。美国 Reda 公司采用特殊的耐高温绝缘材料和橡胶密封材料,设计生产了能适应 150℃ 及以上井温的电动机。

(7)气体处理泵。这是一种针对泵吸入口处存在大量自由气体环境,能有效处理进入泵气体的特殊结构的离心泵,如美国 Reda 公司的 AGH(Advanced Gas Handler),美国 Centrilift 公司的 Gas Master。

(8)串联结构。把两个及以上不同电潜泵,通过适当的结构改进并串接为一体形成的电潜泵称为锥形(tapered)电潜泵。一般靠近本吸入口的电潜泵用于压缩气体,其上的电潜泵用于增加压头。电动机、分离器也可把不同单节串接为一体形成新的电动机或分离器。

(9)低排量高效泵。针对产量较低的深井和斜井,一些公司开发了低排量高效电潜泵。这些新型泵具有大流道、低排量和高效率等特点。大流道的设计有助于开采低重度流体、避免气锁以及减少结垢等,其效率和单级压头均较高。

此外,电潜泵井下监测也取得突破,为实时了解掌握电潜泵在井下的运行状况(如井下泵吸入口压力、泵排出口压力、挂泵位置温度、电动机绕组温升、电潜泵振动压力、井下环境温度、排量等),并根据监测数据对电潜泵的运行状态调整做好了准备。

综上所述,电潜泵采油在硬件(机组各组成部分的设计、制造、生产质量)方面得到了迅猛发展,电潜泵适用范围、系统效率和工作寿命均得到显著提高。然而,由于电潜泵采油系统优化设计技术涉及机械、电工、传热、流体、油藏、采油等相关知识领域,给油田采油工程师和设计制造工程师都造成了一定困惑。目前,各生产厂家与油田企业均逐步形成了电潜泵采油系统的工程设计计算方法,对科学设计计算方法也做了较深入的探讨。

第二节 电潜泵机组的工作原理及特点

一、电潜泵机组的工作原理

电潜泵机组以电能为动力源。电网电压首先经过降压变压器改变电压后输入到变频器,经过变频器换至所需的电源频率后输入到升压变压器,将电压提升到电动机所需电压。然后通过潜油电缆将电能传输给电动机,电动机将电能转换为机械能带动潜油泵高速旋转。潜油泵中的每级叶轮、导轮使井液压力逐步升高,在潜油泵出口处达到潜油泵要求的举升扬程,井液便通过油管举升至地面,最后通过地面管线传输至地面集输系统。

二、电潜泵机组的特点

当前,机械采油已经成为油田开采的重要组成部分。同其他机械采油方式相比,电潜泵具

有其独特的优势,但也有其局限性和缺点。

(一) 电潜泵的优点

- (1) 大排量采油是电潜泵的主要优点。在我国电潜泵已可用于产量为 $40\text{m}^3/\text{d}$ 左右的油井。
- (2) 电潜泵能把油井中上部水层的水注到下部的注水层中,充分利用地层能量。
- (3) 地面设备占地面积小,操作简单,管理方便,有利于美化环境,适用于海上平台。
- (4) 能够较好地运用于斜井、水平井。
- (5) 容易处理腐蚀和结蜡。
- (6) 容易安装井下压力传感器,并通过电缆将压力信号传递到地面,以便进行压力测量。
- (7) 检泵周期较短,油井生产时效相对较高,有利于原油生产。

(二) 电潜泵的缺点

(1) 电潜泵下泵深度既受电动机额定功率的限制,也受油套管尺寸和井底温度的限制。另外,大型高功率设备没有足够的环形空间冷却电动机,会造成电动机的损坏。

(2) 多级高功率大排量电潜泵同其他采油设备相比费用昂贵,使得初期投资费用比较高,特别是电缆的费用。如果考虑抗腐蚀或耐高温,费用则会更高。

(3) 由于整套装置都安装在井下,一旦出现故障,需要起出全部管柱进行修理,造成作业费用增加和停产时间过长。

(4) 井底高温高压等不利环境易使电缆电动机出现故障,同时高气油比井易造成气锁。

(5) 动力源仅为电源,对于零散井,不宜采用此种采油方式。

第三节 电潜泵采油系统概述

一、泵的定义和分类

(一) 泵的定义

泵是一种将能量传递给被抽送的液体,使其能量增加的机器。根据能量传递过程的不同可分为以下三种情况:

- (1) 能量由电动机传递给被抽送的液体,使其能量增加。
- (2) 液体甲把能量传递给液体乙,使液体乙的能量增加从而达到抽送液体乙的目的。
- (3) 把液体中的能量集中到某一部分液流之中,使得这部分液流的能量增加,从而实现抽送该部分液流。

由此可以看出,泵是一种通过把能量传递给液流以达到抽送流体目的的机器。

(二) 泵的分类

泵的种类很多,有多种分类方法。按其工作原理主要分为两大类。一类是叶片泵,它利用叶轮的叶片和液体相互作用来抽送液体,如离心泵、混流泵和轴流泵等。另一类是容积泵,它利用工作室容积周期性的变化来抽送液体,如螺杆泵、活塞泵、柱塞泵和齿轮泵等。另外,还有一些泵未列入这两类泵之中,如射流泵、水锤泵等。泵的分类如图 1-1 所示。

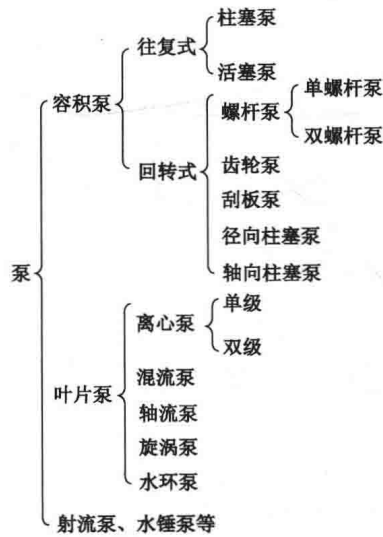


图 1-1 泵的分类

二、电潜泵采油系统介绍

电潜泵是一种主要用来提高液体流线压力的装置,起初是为抽水而设计的。然而,在油气开采过程中,它们是用来抽吸含油率比较低的水。根据泵抽吸流体方式的不同,可分为叶片泵和容积泵。

电潜泵作为叶片泵,不断地把能量传递给液体来提高其流速,线速度差会逐渐形成压能。

电潜泵作为多级离心泵,每一级基本上都由两部分组成:一个导轮和一个叶轮。导轮是引导传动皮带通过障碍物或转换传动皮带方向时所用的一个固定轴。叶轮被安装在旋转轴上,可视为活动部分。装配叶片的叶轮通过旋转使液体颗粒运动,颗粒逐渐加速使得动能增加,所增加的动能最终被转换为压力或传给叶轮和扩散器。

当频率为 60Hz 时,电潜泵的泵送范围为 100bbl/d 到 90000bbl/d,通过变速传动装置可使这一范围继续扩大。在泵连续运行时,平均泵送范围为 1000bbl/d 左右。对于高含液率井,可以使用在入口处安装有特殊气体分离器的电潜泵。针对含腐蚀性流体(如二氧化硫和二氧化碳等)的油井,可在电潜泵的表面涂一层特殊材料进行处理。通过特殊的技术手段,在一定程度上可以达到防砂的目的,从而使泵达到理想的使用寿命。

电潜泵既可在直井中运转,也可以在斜井中运转。但是,不建议电潜泵在狗腿处使用,这是因为电潜泵机组可长达 200ft 的距离,并且其使用寿命会因电动机停靠在套管上而受到显著的影响。电潜泵也可应用于水平井中,在这种情况下,电潜泵的使用寿命取决于电动机隔离井中液体的能力。

电潜泵可应用于 12000ft 深的井中,承受高达 350°F 的井温。但是,此时必须用一些特殊的材料作为保护。标准电潜泵可以在 250°F 的环境下工作,其正常工作的最小套管尺寸是 2.5in,泵效范围从 18% 到 68%。

与其他举升方式相比,电潜泵的生产范围较小。电潜泵可以举升气体,但高气液比也是不

利的。另外,不稳定的电源会影响电潜泵的使用寿命。

电潜泵系统基本上由三大部分七大件组成。最下面的元件是电动机,它被固定在射孔位置之上,此法可有效利用产生的液体使电动机冷却。如果还需要监测井底的工作状况,通常需要在电动机的下面安装一个井下传感器,用它来监测井底压力和温度等参数。紧挨着电动机上面的元件是保护器,位于电动机轴和泵或气体分离器轴之间,它使外部液体压力与内部压力维持平衡,故而可以防止井中液体流入电动机。另外,井底环境和电动机运转会使液体温度升高,进而导致油的膨胀。因此,保护器还将保证存储于电动机转子缝隙之间的油在发生膨胀时而不出现意外。标准吸入管固定在保护器之上,它为井中流体泵出提供了通道。接着往上的是气体分离器,它一般用于高气油比井中,在流体进泵之前通过离心力作用将自由气从液体中分离出来。再往上是多级离心泵,它增加了井中流体的能量。最后是电缆,它的作用是将电能从地面传给井下电动机。地面设备由接线盒、控制屏和三个独立的变压器组成,它们的功能是提供、调节和控制电缆传送给电动机的动力源。电潜泵系统管柱示意图如图 1-2 所示。

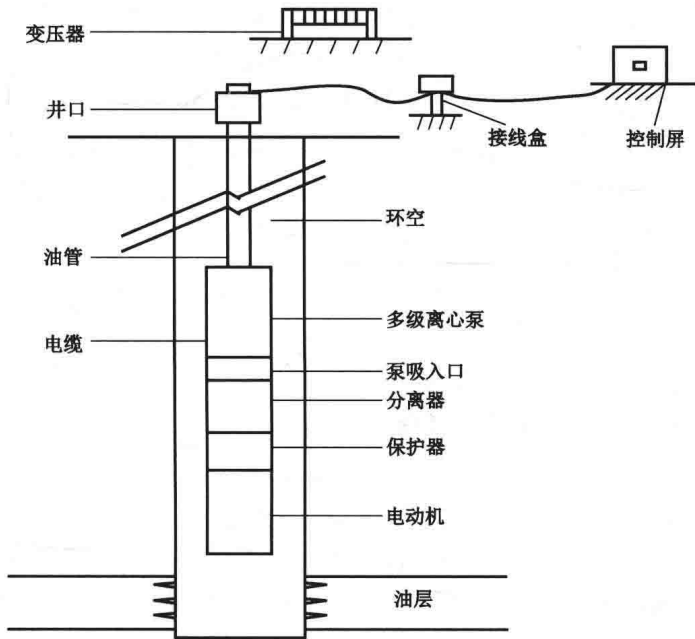


图 1-2 电潜泵系统管柱示意图

- (1) 井下部分:包括电动机、保护器、分离器和多级离心泵。
- (2) 中间部分:电缆。
- (3) 地面部分:包括控制屏、接线盒和变压器。

(一) 电潜泵(ESP)

电潜泵是一种多级离心泵,每一级基本上由一个旋转的叶轮和一个静止的导轮组成,可根据生产容积和举升确定总级数,再根据总级数确定电动机马力和总水头。为了达到最佳的防腐效果,导轮常用耐蚀镍合金材料制造,并用金属外壳作为保护膜。

泵有标准吸入和气体分离器吸入两种吸入形式。当游离气或气液比低于 10% 时,使用标准吸入,电潜泵正常工作。但随着气体的增多,压力会减小,泵最终将会“气锁”。

对于含气井而言,井液在进入电潜泵之前,要先通过油气分离器进行气液分离,以减少气体对电潜泵工作性能的影响。目前,分离器的基本结构形式有两种,一种是旋转式分离器,另一种是沉降式分离器。电潜泵机组在工作中,气液混合液进入分离器并被分离后,气体进入套管与油管的环形空间,而液体被引入电潜泵中。

(二) 电动机(motor)

电动机是泵的“心脏”。电潜泵机组中使用的电动机为二级三相鼠笼式异步电动机,通常在 60Hz 频率下以 3500r/min 的速度运转,或在 50Hz 频率下以 2915r/min 的速度运转。对同一电动机,泵在 50Hz 时的功率为 60Hz 时功率的 58%。

电动机的轴通常用低碳钢制造。根据电动机的马力和长度,鼠笼式转子可由一部分或多部分组成。深井中要求使用高压电动机,因为随着井深的增加,电压损耗会增多。另外,如果使用的电缆较小,初期投资成本虽会降低,但却需要使用一个更昂贵的高压转换器。电动机内部含有一种精炼油,它的功能是润滑轴承并把电动机产生的热量传递到电动机外壳,而电动机外壳可由井中产生的液体来冷却,这就意味着电动机应该位于井中射孔孔眼之上。为了达到好的冷却效果,最小的产液流速应为 1ft/s。电动机的功率受到自身直径和长度的限制,在频率为 60Hz 时,功率变化范围为 7.5hp(3.75 系列)到 1020hp(7.38 系列)。根据油井产量、扬程、温度、精炼油黏度及不同规格的套管,可选用不同功率、直径的电潜泵。

电动机工作电压一般为 400 ~ 2500V,电流为 30 ~ 120A。电动机功率与电动机长度成正比,单节电动机长度最长不大于 10m。电动机可以串联使用,串联方式采用内插式结构,轴连接采用花键连接。

(三) 保护器(seal 或 protector)

电动机保护器有多项功能,具体如下:

- (1) 连接电动机的驱动轴和泵轴以及电动机壳和泵壳。
- (2) 可以罩住电动机的止推轴承。
- (3) 防止井中液体流入电动机内。

(4) 当电动机运行时,电动机内的润滑油因温度升高而膨胀,保护器内有足够的空间储存因膨胀而溢出的电动机油。反之,当润滑油的温度下降而收缩时,保护器内的润滑油又可返回补充给电动机。

保护器能防止井中流体进入电动机,同时平衡电动机内部压力和井底压力(BHP)。密封腔总共有两种类型,一种是迷宫式密封腔,允许原油通过一些隔离腔与井液连通,流体由于受重力作用而在连接的隔离腔内分开;另一种是隔离式密封腔,拥有一个弹性流体绝缘袋,允许电动机运转中润滑液体的膨胀和收缩。

(四) 电缆(cable)

电缆的功能是为电动机提供电能,按照机械构造形态可分为两类:圆形电缆和扁平电缆。无论是圆形电缆还是扁平电缆,都主要由导体、绝缘层、护套层和钢带铠所组成。标准电缆尺寸范围为 1 ~ 6AWG(美国线缆规格),导线材料是铜。根据环境的不同,可以使用多种外壳和绝缘材料。电缆的选择取决于电压降、电流强度、油套环形空间、井底温度和流体状况(主要指腐蚀性)。

(五) 控制屏(control screen)

电潜泵的启动和停机,需要用专门的控制设备来完成。控制屏可实现这一功能,它还可以对电潜泵系统的短路、过载、欠保护以及欠载延时等状况进行自动启动。对于一个标准的控制屏,电压的变化范围为 600V 到 4900V。控制屏的另一个功能是检测异常过流/超负荷或欠电流供应,这为井下设备的保护提供了可能,因为井中经常会发生一些异常的情况,如停泵、气锁、油管泄漏等。电潜泵的控制屏分为手动和自动两种方式,在电流供应不足时,借助于人工选择延迟程序控制屏可自动地重新启动;在超负荷状况时,可使用人工操作重新启动。通过控制屏仪表可随时测量电动机运行电压和电流参数,从而使电潜泵监测人员及时、准确地掌握和判断电动机的运行状况,最终使电潜泵达到最佳的工作状况。

(六) 变压器(transformer)

变压器是用来改变交流电电压的一种设备。变压器的选择应根据初级电压系统的输入电压和所需的次级输出电压来决定。变压器由一个铁芯和缠绕在铁芯上的绝缘铜线线圈组成,通常铁芯和线圈浸泡在变压器油里。变压器油不但可以作为绝缘介质,而且对变压器有一定的冷却作用。

电潜泵机组中所使用的变压器一般是三相自耦变压器,这种变压器的部分线圈用于低压,整个线圈接在高压电路上,如图 1-3 所示。

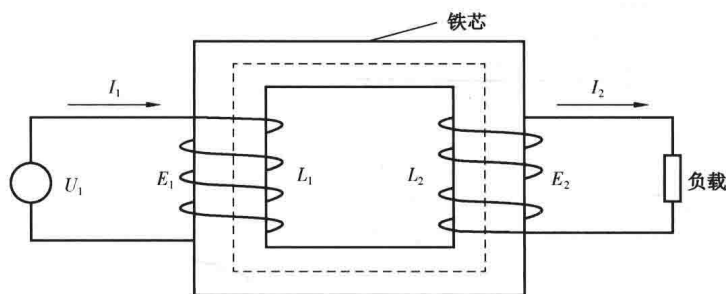


图 1-3 变压器

(七) 井口装置(wellhead equipment)

井口装置由套管尺寸、油管尺寸、最大推荐载荷、井口压力和最大安装深度所确定,其主要功能是利用压力来密封油管和电缆之间的空间,用此种方法,可减小通过电缆的气体运移速度。

(八) 接线盒(junction box)

接线盒安装在井口装置和控制屏之间,它的功能是放空由潜油电缆线芯内上升至井口的天然气,从而防止天然气在控制屏中聚集和爆炸。

参考文献

- [1] Brown K E. The Technology of Artificial Lift Methods (Volume 2b). PennWell Publishing Company, 1980.
- [2] 毕玉芬, William Milne. 石油工业对电潜泵的新要求[J]. 国外石油机械, 1996, 7(2): 66-67.
- [3] 程心平, 薛德栋, 秦世利, 等. 深水油田双电潜泵采油技术[J]. 石油机械, 2015, 43(1): 64-68.

- [4] 董振刚,张铭钧,张雄,等. 潜油电泵合理选配工艺研究[J]. 石油学报,2008,29(1):128 - 131.
- [5] 梅思杰,邵永实,刘军,等. 潜油电泵技术[M]. 北京:石油工业出版社,2004.
- [6] 石在虹,李波,崔斌,等. 电潜泵井生产动态分析[J]. 石油学报,2003,24(1):100 - 104.
- [7] 师世刚,等. 潜油电泵采油技术[M]. 北京:石油工业出版社,1993.
- [8] 王惠勋. 潜油电泵的原理及使用[M]. 北京:石油工业出版社,1994.
- [9] 王欣辉. 潜油电泵采油技术研究与实践[M]. 东营:中国石油大学出版社,2015.
- [10] 王鹏,张焯,王滨海,等. 潜油电泵电缆[J]. 石油科技论坛,2013,(5):52 - 54.
- [11] 吴瑞坤,刘启智,张鸣宇. 潜油电泵优化设计及功效分析[J]. 中外能源,2006,11(2):39 - 42.
- [12] 朱君,姜民政,崔振华. 潜油电泵高效运行的研究[J]. 石油学报,1997,18(2):117 - 121.

第二章 电潜泵采油系统相关基础理论

本书在讨论电潜泵采油系统设计计算方法过程中将反复使用一些采油基础理论和公式。为便于读者理解本书计算结果、掌握目前国际上常用于电潜泵采油系统设计与分析的基本公式和理论、加深对基本公式的理解与认识,本章从最基本的油、气、水物性开始,介绍了油藏流入动态理论与公式、井简单相流理论与公式、井筒两相流理论与公式。此外,由于大部分公式是建立在其所用实际数据的基础上,对其他油田应用有一定的局限性,本书较系统地讨论了目前国际上使用较广泛的其他公式。本章介绍的理论与公式不但可应用于电潜泵采油,也适用于其他采油气领域。

采油气领域中所涉及的油气水物性、流入动态、井筒流动,以及流体在泵等井下设备中的流动均与压力与温度有关。一般有油藏温度压力,流体从油藏到地面流动过程中任何一点的实地(in-situ)温度压力,地面气体分离器处的温度压力,以及地面标准状态下的温度压力。需要注意的是,采油气中能换算到标准状态下的各变量一般均采用其在标准温度和压力下的值。

第一节 原油物性

油气水物性包括密度(density)、溶解气油比(solution gas-oil ratio)、地层原油体积因子(oil formation volume factor)、黏度(viscosity)和泡点压力(bubble-point pressure)等。目前已建立了很多关于油气水物性的计算公式,这些公式基本都是基于某一特定地区数据归纳分析出的经验公式。经验公式中的变量基本都是以美制油田单位(oil field units)为单位,转换为公制单位后,其系数也需要发生相应变化。为尊重作者的原创性以及便于读者核对,本书以原公式和单位表示,而不转换为公制。

应用美制油田单位公式时,需先把各变量公制单位转换为油田单位,带入转换后的油田单位数值,按原公式进行计算,最后把油田单位计算结果转换为公制即可。

本章介绍的内容是电潜泵设计计算基本公式,在电潜泵设计计算时会反复使用。本章讨论的公式是目前石油工业采油界普遍接受并采用相对较多的公式,部分计算会介绍多个公式。本书不讨论公式相对优劣的问题,也不介绍最新公式,油田电潜泵采油工程师可根据自己习惯或认知选取。

所讨论的公式尽量采用原文所用的符号,为便于全书统一,一些用得较偏的符号换为了较普遍的符号。

一、原油密度

原油密度(density)是指在一定温度和压力下单位体积原油的质量,用 ρ_o 表示。原油相对

密度(specific gravity)是指在标准温度和压力下原油密度与纯水密度的比值。美制油田单位中,标准温度为 60°F,标准大气压为 14.7psia。若纯水密度为 ρ_w ,则原油相对密度 γ_o 为:

$$\gamma_o = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad (2-1)$$

另一个常用的相对密度为 API 密度(API gravity),用 $^{\circ}\text{API}$ 表示。 $^{\circ}\text{API}$ 与原油相对密度 γ_o 的关系由下式计算:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5 \quad (2-2)$$

由式(2-2)可见, $^{\circ}\text{API}$ 与 γ_o 成反比, $^{\circ}\text{API}$ 越大,原油密度越小;反之, $^{\circ}\text{API}$ 越小,原油密度越大。一般原油的 $^{\circ}\text{API}$ 范围为 47(轻质原油)到 10(重质原油)。

下面介绍目前国内外常用的原油密度计算公式。

(一) Standing 方法(1981)

Standing 通过对加利福尼亚 22 种不同原油和天然气混合物的 105 组数据进行分析,得出在任意温度和压力下的原油密度。Standing 公式无需知道原油的组分。

$$\rho_o = \frac{62.4\gamma_o + 0.0136R_s\gamma_g}{0.972 + 0.000147 \left[R_s \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_o} \right)^{0.5} + 1.25(T - 460) \right]^{1.175}} \quad (2-3)$$

式中 ρ_o ——原油密度,lb/ft³;

γ_o ——原油相对密度;

R_s ——一定温度和压力下的溶解气油比,scf/STB;

γ_g ——天然气相对密度;

T ——温度, $^{\circ}\text{R}$ 。

(二) Katz - Standing 方法(1942)

Katz(1942)提出了密度的图示计算,Standing(1977)给予修正。他们通过试验评估了甲烷含量高达 60% 的 15 组原油的密度数据,得出该计算公式。Katz - Standing 公式与实验数据的平均绝对误差在 1.2% 到 4% 之间。初始公式中并未考虑含大量非烃类的情况。

$$\rho_o = \rho_{sc} + \Delta\rho_p - \Delta\rho_T \quad (2-4)$$

式中 ρ_o ——原油在压力 p 和温度 T 下的密度,lb/ft³;

ρ_{sc} ——原油在标准状态下的密度(14.7psia 和 60°F),lb/ft³;

$\Delta\rho_p$ ——压力 p 下原油密度修正项,lb/ft³;

$\Delta\rho_T$ ——温度 T 下原油密度修正项,lb/ft³。

式(2-4)中:

$$\rho_{sc} = \frac{350.367\gamma_o + \frac{R_s\gamma_g}{13.1}}{5.615 + \frac{R_s\gamma_g}{13.1\rho_{ga}}}$$