

特低渗透油田有杆泵

采油技术及软件应用

TEDI SHENTOU YOUTIAN YUGAN BEN
CAIYOU JISHU JI RUANJIAN YINGYONG

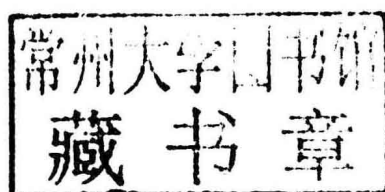
魏航信 吴 伟 著



石油工业出版社

特低渗透油田有杆泵 采油技术及软件应用

魏航信 吴 伟 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面系统地阐述了特低渗透油田有杆泵设备综合评价及选型、抽油泵泵效分析、有杆泵系统优化设计、有杆泵系统工况诊断以及基于示功图的单井计量技术,同时介绍了每种技术的软件开发方法及其应用。本书注重将理论与软件实现相结合,能反映特低渗透油田近几年的现状及发展趋势,是一本实用性很强的工具书。

本书可供从事油气田开发的工程技术人员及石油院校的师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

特低渗透油田有杆泵采油技术及软件应用/魏航信,吴伟著.
北京:石油工业出版社,2016.6

ISBN 978-7-5183-1268-9

I. 特…

II. ①魏… ②吴…

III. 有杆泵-机械采油

IV. TE355.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 092501 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010) 64523537

图书营销中心:(010) 64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:12.5

字数:315 千字

定价:48.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

中国以往开发的石油大部分是从渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层中开采出来的, 小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层中有 90% 以上的储量未动用。在 2008 年中国第三次油气资源评价中, 剩余石油资源储量为 $765 \times 10^8 \text{t}$, 其中低渗透、特低渗透剩余储量就高达 $431 \times 10^8 \text{t}$ 。随着地质勘探技术的不断进步, 中国特低渗透油田的数量及规模也随之增加, 出现了地质储量超亿吨的大油田。近年来在长庆、延长、大庆、吉林、辽河、胜利主要油田陆续发现了许多特低渗透油藏, 例如延长油田探明石油储量 $19.5 \times 10^8 \text{t}$, 油藏面积 $10.89 \times 10^4 \text{km}^2$ 。在近几年探明的石油地质储量中, 低渗透、特低渗透油藏的石油地质储量所占比例高达 60% ~ 70%, 甚至更高。

因此, 中国石油资源产量接替的重要组成部分已经从中、高渗透转变为以低渗透、特低渗透油藏为代表的复杂油藏。特低渗透油藏的开发将成为中国未来油气发展的主流, 成为油气田开发的主战场。经过多年的研究和试验, 中国在特低渗透油田的特征认识、开发决策和工艺技术等方面, 都有了较大的发展和提高。但是, 目前世界范围内的特低渗透油藏开发均没有取得突破性进展, 特低渗透储量的动用程度很低, 只有储层条件好、埋藏浅的特低渗透油藏才得到较好的开发。因此, 开采特低渗透油藏, 开展理论和技术创新, 形成一套适合中国特低渗透油藏特征的开发理论和技术体系, 使特低渗透油藏的开发获得重大突破, 将大大提高中国石油资源的利用率, 确保中国石油产量的稳定和增长, 维护中国石油安全, 满足国民经济发展的重大需求。

有杆泵采油技术是目前国内外应用得最多、最成熟的技术, 但关于中、高产油田的研究成果较多, 而对于特低渗透油田的研究成果尚未见相关报道, 因此目前多参考已有的中、高产油田的研究成果。比如对于特低渗透油田机杆泵设备选型问题, 参考手册中的机泵图、杆管表往往导致机杆泵选型过大、能耗偏大; 在有杆泵系统优化设计方面, 适用于高产井的模型应用于特低渗透油井则导致供排不协调; 对于特低渗透油田低产低效井的抽油杆柱三维力学模型, 没有考虑到特低渗透油田油井特点, 导致抽油杆柱力学分析误差较大, 扶正器

分布设计不合理；特低渗透油田油井生产中常会出现泵充满度不够、空抽、杆管偏磨等故障，借用高产井的示功图故障诊断理论故障识别率低，不能及时发现故障。关于有杆泵采油的软件应用方面，国内外也开发出一些油气井单井设计分析软件，但这些软件直接应用于特低渗透油田则存在一些问题，比如由于特低渗透油井地层供液不足、泵充满度不够，导致泵效预测值以及单井产液量预测的误差偏大等。

因此，为了满足特低渗透油田有杆泵采油技术开发需要，作者结合自己多年特低渗透油田技术开发经验而编写了本书。本书全面系统地讲述了中国特低渗透油藏有杆泵采油相关技术，同时本书阐述了每种技术的软件编制思路及在特低渗透油田的应用。本书第一章至第四章、第六章和第七章由魏航信编写，第五章由吴伟编写，最后由魏航信对全书进行了审定。

本书在编写过程中还得到了西安石油大学、延长石油（集团）研究院、延长油田股份有限公司相关技术人员的大力支持。在该书完成后，西安石油大学的吕冰欣、王文芳、吴军军等几位研究生对书中的公式及部分图幅进行了清绘，在此对他们付出的辛勤劳动表示感谢。

本书的出版获西安石油大学优秀学术著作出版基金资助，并获得国家自然科学基金资助（项目编号 51405385）。

由于笔者水平有限，书中错误和不足之处在所难免，敬请专家和读者批评指正，以便不断改进和完善。

2016 年 2 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 特低渗透油藏特点及开发方法	(1)
第二节 特低渗透油田机械采油现状	(4)
第三节 特低渗透油田有杆泵采油技术及发展趋势	(7)
第二章 井下物性参数计算	(10)
第一节 概述	(10)
第二节 井下流体相关参数计算	(13)
第三节 井下流体压力计算的迭代算法	(14)
第四节 油井流入动态预测	(20)
第五节 井下物性参数计算的软件实现	(22)
第三章 有杆泵设备综合评价及选型	(28)
第一节 抽油机技术特点及适用范围	(28)
第二节 抽油机技术经济性综合评价	(34)
第三节 抽油杆技术经济性综合评价	(43)
第四节 抽油泵技术经济性综合评价	(49)
第五节 抽油机选型	(54)
第六节 抽油杆选型	(60)
第七节 抽油泵选型	(63)
第八节 基于 B/S 模式的有杆泵设备综合评价选型软件及其应用	(65)
第四章 有杆泵设备泵效分析	(77)
第一节 特低渗透油田泵效数学模型	(77)
第二节 抽油泵泵效影响因素	(81)
第三节 抽油泵泵效提高的工艺参数优化模型	(87)
第四节 抽油泵泵效分析软件及其应用	(88)
第五章 有杆泵系统优化设计	(95)
第一节 有杆泵系统工艺参数的优化设计	(95)
第二节 抽油机悬点载荷的计算	(97)

第三节	有杆泵系统扶正器优化布置	(107)
第四节	有杆泵系统优化设计软件及其应用	(125)
第六章	有杆泵系统工况诊断	(132)
第一节	概述	(132)
第二节	地面示功图分析	(136)
第三节	基于神经网络的油井工况诊断	(144)
第四节	基于模糊算法的油井工况诊断	(149)
第五节	有杆泵系统工况诊断软件及其应用	(152)
第七章	基于示功图的有杆泵系统单井计量	(158)
第一节	概述	(158)
第二节	功图法计量技术的工作原理	(161)
第三节	泵功图预测	(163)
第四节	油井产液量计算	(169)
第五节	有杆泵系统单井计量软件及其应用	(177)
参考文献		(189)

第一章 绪 论

第一节 特低渗透油藏特点及开发方法

在我国,一般将渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层统称为低渗透油田,进一步又把渗透率在 $(10 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为低渗透油田,渗透率在 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为特低渗透油田,而渗透率在 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为超低渗透油田。我国以往开发的石油大部分是从渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层中开采出来的,小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层中有 90% 以上的储量未动用。在 2008 年中国第三次油气资源评价中,剩余石油资源储量为 $765 \times 10^8 \text{t}$,其中低渗透剩余储量就高达 $431 \times 10^8 \text{t}$ 。随着地质勘探技术的不断进步,我国低渗透油田的数量及规模也随之增加,出现了地质储量超亿吨的大油田。可见,对于低渗透、特低渗透油田的开发具有重要的意义。

但是,由于低渗透、特低渗透储层具有孔喉结构较复杂、储层渗透率较小、物性较差,且产能较低的特点,而伴随着油藏埋藏深度的加深,储层经受的地质作用又较浅层油藏更复杂,所以对低渗透油藏的开发比常规油气藏更为复杂。目前,对低渗透储层的各种规律认识水平得到了很大提高,已形成了一套适合其特点的较为系统的技术体系。而对特低渗透储层的规律认识还较少,对其进行机械采油方面的研究资料更为缺乏,因此对特低渗透油田关于机械采油、尤其是有杆泵系统采油的研究就显得更加重要。

一、低渗透储层特征

(1) 低孔、低渗、自然产能低。总体上看,岩屑含量高、黏土或碳酸盐胶结物较多是低渗透砂岩储层的普遍现象。据统计,低渗透油田储层平均孔隙度为 18.55%,就油层孔隙度分布而言,平均孔隙度在 10%~20% 的油层占 36.67%,平均孔隙度大于 20% 的油层占 13.33%,其余 50% 左右油层的孔隙度小于 10%。储层渗透率一般为 $(1 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但各个油田的情况不一。从 18 个油田 28 套油层统计,平均渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油层占 61%, $(10 \sim 20) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油层占 21%。我国的低渗透油田的油藏中,一半以上的储量存在于渗透率小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油层中。常规投产甚至不出油,必须经过油层改造才能达到商业产能。

(2) 孔喉细小,溶蚀孔发育。低渗透砂岩储层的孔隙以粒间孔隙为主,原生粒间孔隙和次生粒间孔隙都发育,但溶蚀孔隙相对较发育,另外还有微孔隙、晶间孔和裂隙孔。低渗透储层以中孔、小孔为主,喉道以管状和片状的细喉道为主,根据大量低渗透油藏砂岩储层的统计,喉道半径一般小于 $1.5 \mu\text{m}$,非有效孔隙体积在整个孔喉体积中所占比例较大,在 26%~65%,平均 30%,直接影响储层的渗透性。

(3) 原油黏度低、密度小、性质较好。我国低渗透油田的原油具有密度小、黏度小的特点,另外原油凝固点比较高、含蜡量比较高,原油密度一般为 $0.84 \sim 0.86 \text{g/cm}^3$,地层原油黏

度一般为 0.7~8.7mPa·s。原油性质好是低渗透油田开发的一个重要的有利因素。

(4) 储层敏感性强。低渗透砂岩油藏储层碎屑颗粒分选差，黏土和基质含量高，成岩作用强，油层孔喉细小，容易造成各种损害。

(5) 特低渗透油层流体流动状态具有非达西流的特征，非达西渗流具有明显的启动压力梯度。非达西渗流特征具体表现为：在压力梯度与渗流速度关系曲线上，当压力梯度在比较低的范围内，渗流速度的增加呈凹型非线性曲线；当压力梯度较大时，渗流速度呈线性增加，该线性直线段的延伸线与压力梯度坐标交于不经过坐标原点的某点，该点为启动压力梯度；低速非达西渗流特征与流体性质和渗透率有关，渗透率越低、原油黏度越大，非线性段延伸线范围越长，启动压力梯度越大；当存在启动压力梯度时，单井产量减小，其减小幅度与渗透率大小、原油的极限剪切应力和井距有关；渗透率越低，油井产量降低的幅度越大；原油的极限剪切应力越大，油井产量降低的幅度越大；井距越大，油井产量降低的幅度越大；生产压差越小，油井产量降低的幅度越大。

例如某低渗透油田油藏特征见表 1-1，特低渗透油田油藏特征见表 1-2。

表 1-1 某低渗透油藏基本数据表

项目	数据	项目	数据
储层	E2Q4 ³	地质储量, 10 ⁴ t	259
小层, 个	2	含油面积, km ²	18.4
油藏埋深, m	2000~3300	标定采收率, %	37.69
平均油层厚度, m	2.1	可采储量, 10 ⁴ t	97.65
平均孔喉比	0.31	平均有效孔隙度, %	16.3
喉道宽度平均值, μm	5.67	平均空气渗透率, 10 ⁻³ μm ²	34
平均排驱压力, MPa	3.12	原始地层压力, MPa	26.42
中值压力, MPa	9.31	饱和压力, MPa	4.84
平均孔喉半径, μm	0.17	地层温度, ℃	89.5
分选系数	0.10	压力系数	1.19
地层水矿化度, 10 ⁴ mg/L	6.7~33	地面原油密度, g/cm ³	0.853~0.881
水型	NaHCO ₃	地面原油黏度, mPa·s	12~29
地层水黏度, mPa·s	0.6292~0.9336	地层原油密度, g/cm ³	0.759
地层水密度, g/cm ³	1.061~1.14	地层原油黏度, mPa·s	3.5
原始油气比, m ³ /t	41.7	原油体积系数	1.16
综合压缩系数, 10 ⁻⁴ MPa ⁻¹	3.35	原油凝固点, ℃	28~34

表 1-2 某特低渗透油藏基本数据表

项目	数据	项目	数据
生产层位	长 6	生产井段, m	533.5~536.5
地层压力, MPa	2.627	地层温度, ℃	26.4
溶解气油比, m ³ /t	4.36	地层原油密度, g/cm ³	0.8190
地层油体积系数	1.0078	天然气相对密度	1.3388
地层油体积收缩率, %	0.78	地层原油黏度, mPa·s	6.221
饱和压力, MPa	0.321	渗透率, 10 ⁻³ μm ²	1.89
表皮系数	-4.29	井筒温度梯度, ℃/30m	0.70

二、开发现状

国外低渗透油藏开发时间长,从美国 1871 年发现著名的勃莱德福油田起,已有 100 多年的历史。国外研究认为,低渗透油田尤其是高压低渗透油田初期压力高、天然能量充足,最好首先选用自然能量开采,尽量延长无水和低含水开采期,他们一般都先利用弹性能量和溶解气驱能量开采,但是油层产能递减快,一次采收率低,只能达到 8%~15%。进入低产期时再转入注水开发,采用注水保持能量后,二次采收率可提高到 25%~30%。

对于中深层低渗透油藏,在早期的开发中,主要依靠弹性驱、溶解气驱等天然能量进行开采,但中深层低渗透油藏天然能量较低,油田开发表现出产能较低,地层能量消耗较快,地层压力快速下降,油井产量递减快,采收率也较低等特征,所以在此类油藏的开发初期,就往往形成油井低产、开发较困难的被动局面。之后,对于这类油藏的开发,绝大多数油田采用通过人工注水保持地层能量的开发方式,通过这种开发方式,可以提高油藏的采收率。在此基础上,很多学者对注水时机,合理注入量等进行了研究,苏联学者提倡通过早期注水来保持地层能量,美国学者则认为在地层压力处于低于油藏饱和压力附近时再注水,这时原油流动状态最佳,而且这个时机注水投资较少,利润也较高。所以对于天然能量较小的油藏,选择早期注水补充能量,而当油藏弹性能量较大以及油田异常高压,就可以适当推迟注水时间。

国内关于低渗透油藏研究方面,通过“九五”以来的研究攻关和试验,我国对低渗透油田的特征认识、开发决策和工艺技术等各个方面,都有了新的较大发展和提高,主要体现在以下几个方面。

(一) 储层特征研究方面

(1) 储层和含油性预测技术。对储层的沉积、岩性、物性等方面进行了系统的研究,利用地震预测和测井资料,进行多参数逐级联合反映,预测储层分布状况和含油气程度。

(2) 储层裂缝识别研究和预测技术。利用露头 and 岩心观测、常规和成像测井、地应力测定和地质建模等技术,研究储层裂缝特征和预测储层裂缝分布。

(3) 储层孔隙结构和可动流体研究新技术。利用核磁共振新技术,研究储层微观孔隙结构和可动流体饱和度的关系。

(二) 渗流机理研究方面

(1) 非达西渗流特征。通过深入的实验研究,进一步认识了非达西渗流特征,并初步建立了非达西渗流方程,开发了相应的数值模拟软件。

(2) 流固耦合作用。通过实验,证实了低渗透储层压力敏感性强烈,流固耦合作用对储层物性影响明显。

(3) 渗吸作用。发现渗吸作用在低渗透储层中排油作用较大,初步确定了与渗吸作用相协调的最佳驱油速度。

(三) 油田开发方法和井网方面

(1) 开发方式。从生产实践中观察看出,先期注水能够保持较高的生产能力,比滞后注水具有明显的优越性。初步开展了注气方式开采试验。

(2) 油田动态特征。进一步观察研究和认识了低渗透油田注水开发后,地下压力场和流体场的分布特征和规律。

(3) 开发井网。通过现场生产试验和深入观察分析,进一步总结出裂缝性低渗透油田

科学合理的部署开发井网的方针原则和界限。

(四) 钻采工艺技术方面

(1) 适应低渗透油田开发的钻井工艺技术。小井眼和水平井钻井技术都有新的发展,特别是欠平衡钻井技术对裂缝性低渗透油田的开发效果十分明显。

(2) 水力压裂技术。整体高效压裂技术有了新的发展,对裂缝性低渗透油田,将压裂技术与开发井网科学地有机结合,可以获得较好的开发效果和经济效益。

(3) 低成本的采油工艺技术。根据特低渗透油田油井产量低的特点,试验和发展了无油管、螺杆泵、电潜泵以及活动采油和注水技术等。

第二节 特低渗透油田机械采油现状

特低渗透油藏由于供油能力有限,一般需要采用人工举升方法进行采油。人工举升方法中,目前主要使用机械采油方法,而有杆泵采油是机械采油中最主要的方法。虽然有杆泵系统存在耗电量大、系统效率低等缺点,但其可靠性高、结构简单、使用维护成本低,因此目前仍然占据机械采油的主导地位,机械采油中90%以上仍然是有杆泵采油。随着机械采油技术的发展,在无油杆抽油系统(如螺杆泵采油、电潜泵采油、气举法采油等)方面将逐步进行研究和试验。

一、有杆泵系统

有杆泵采油系统主要包括抽油机、抽油杆和抽油泵。采油时利用抽油机驴头的上下往复运动,通过抽油杆,将动力传递到井下抽油泵,抽油泵柱塞在上下往复运动过程中,将井下原油举升到井口。原油在抽油杆和油管组成的杆管环空内流动。有杆泵系统采油效果主要取决于抽油机、抽油杆、抽油泵的性能。有资料统计表明,有杆泵系统消耗的电量占油田总耗电量的25%~30%。

(一) 抽油机

抽油机是为抽油杆提供动力的地面驱动设备,可以分为两种:游梁式抽油机和无游梁抽油机,二者的区别在于是否使用游梁将电动机动力转化为光杆的往复运动。目前世界上应用最广泛的抽油机是游梁式抽油机。游梁式抽油机从结构形式上可分为:常规型、前置型、异相型、低矮式、活动式等;按平衡方式可分为:游梁平衡、曲柄平衡、复合平衡、气动平衡、差动平衡、天平平衡、液力平衡等;按驴头结构形式可分为:上翻式、侧转式、分装式、整体式、旋转式、大轮式、双驴头式、异驴头式、上挂式、低头式等;按齿轮减速器传动型式可为:齿轮式、链条式、皮带式、行星轮式等;按底座的固定方式可分为:压杠固定、地脚螺栓固定等;按驱动方式可分为:普通异步电动机、多速异步电动机、变压异步电动机、大转差率电动机、超转差率电动机、天然气发动机、柴油机、直线电动机驱动等。

常规游梁式抽油机主要由电动机、皮带传动、减速箱、曲柄、连杆、游梁及驴头等部分组成。电动机的旋转运动通过皮带转动到减速箱输入轴,减速箱输出轴转动,带动曲柄旋转,曲柄、连杆、游梁及机架组成四杆机构,当曲柄旋转时,游梁往复摆动,从而使得驴头作上下往复摆动,驴头上的钢丝绳通过悬绳器与光杆、抽油杆连接,驴头往复摆动,使得抽油杆作上下往复运动。

（二）抽油杆

抽油杆是有杆抽油设备的重要部件，它将抽油机的动力传递给井下抽油泵。在整个抽油系统中，抽油杆柱是一个关键且薄弱的环节，一旦某一根抽油杆发生失效，则整个抽油杆柱就不能工作。若在生产时发生断裂、脱扣等情况，则需要进行打捞作业，不仅影响产量，而且耗时耗力，增加采油成本。

我国现有的抽油杆生产企业，年生产能力达 $9510 \times 10^4 \text{ m}$ ，居世界第一位。我国已研制成功的多种级别、多种用途的抽油杆有 12 种：D 级抽油杆、K 级抽油杆、KD 级抽油杆、HY 型抽油杆、HL 型抽油杆、空心抽油杆、电加热抽油杆、螺杆泵专用抽油杆、玻璃钢抽油杆、涂层防腐抽油杆、钢连续抽油杆和碳纤维复合材料连续抽油杆。

我国抽油杆产品质量的主要问题是抽油杆锻造质量不能完全达到要求：如有些抽油杆锻造时出现过热或过烧现象；杆头出现折叠、裂纹、过充满、未充满等缺陷；杆头外形不圆滑；锻造热影响区的疲劳性能低，油田使用发现大部分断裂的抽油杆都断在锻造热影响区。

（三）抽油泵

抽油泵属于一种特殊形式的往复泵，动力从地面经抽油杆传到井下，使抽油泵的柱塞作上下往复运动，将油井中的原油沿油管举升到地面。抽油泵主要由泵筒、柱塞、固定阀组件、游动阀组件等部分组成。柱塞往上运动时，柱塞下面的空腔容积增加，固定阀打开，原油进入抽油泵泵筒，同时游动阀关闭，其上的原油沿杆管环空排出到井口。柱塞往下运动时，柱塞下面的空腔容积减小，固定阀关闭，游动阀打开，原油也被排出到井口。

抽油泵按结构分，可分为杆式泵和管式泵。管式泵和油管串联，检泵时需要起下油管，作业时间长。杆式泵泵筒直接固定在油管内，检泵时不用起下油管，因而可以节约作业时间。美国杆式泵使用量较多，而我国由于杆式泵制造质量不高以及下泵技术复杂等原因，还广泛使用管式泵。由于杆式泵泵径可以达到 28mm，在特低渗透油田低产井应用时，泵效明显高于大泵径的管式泵，因此我国在特低渗透油田将越来越多地使用杆式泵。

近年来国内外先后研制成功了一系列新型有杆抽油泵，如双管泵和多相泵等抽稠泵、抗冲蚀泵、自旋转柱塞泵、旋流柱塞泵等防砂泵及连续油管抽油泵等高效抽油泵。

二、螺杆泵系统

螺杆泵采油主要是利用螺杆泵的定子与转子形成的封闭空间，当转子转动时，存储在密封空间的原油被强制从螺杆泵吸入口挤向排出口，从而实现采油。螺杆泵和抽油泵的最大不同是，螺杆泵的转子为旋转运动，而抽油泵的柱塞为直线往复运动。按照螺杆泵转子的驱动方式不同，螺杆泵系统又可分为地面驱动螺杆泵和井下驱动螺杆泵。地面驱动螺杆泵是通过地面电动机及减速器，带动抽油杆旋转，抽油杆与螺杆泵转子连接，使其转子转动实现采油。井下驱动螺杆泵主要是将电动机直接安装在井下的螺杆泵上，电动机通过井下电缆供电。我国目前主要采用地面驱动螺杆泵举升技术，它是最早从国外引进的采油技术，系统包括地面驱动头、抽油杆、螺杆泵等主要部分，在高黏度、高含砂、含气井中优势明显，成为继游梁式抽油机和潜油电泵之后的主力人工举升方式，尤其是在聚合物驱和三元复合驱中表现出良好的适应性。

我国自 20 世纪 80 年代开始研发螺杆泵，一直致力于增加下井深度、提高排量、延长寿命和拓宽使用范围。近年来，随着对橡胶技术和等壁厚螺杆泵等新结构的深入研究，螺杆泵性能进一步提高，已形成排量为 $5 \sim 240 \text{ m}^3/\text{d}$ 、扬程为 500~2000m 的系列产品。目前中国石

油地面驱动螺杆泵井超过 1.1×10^4 口，平均检泵周期约 700d，基本与抽油机持平。从螺杆泵的能耗情况看，普通螺杆泵比抽油机节电 20%~23%，新研发的地面永磁直驱电动机，又比普通螺杆泵节电 16%~17%。国外 NOV 公司螺杆泵设计的泵挂深度达到了 3800m，是目前螺杆泵举升最深泵挂。

由于地面驱动螺杆泵抽油杆受扭转和弯曲复合载荷作用，容易发生屈曲与油管接触，目前存在的主要问题是杆管偏磨，尤其是在斜井、定向井中，问题更加突出。对于特低渗透油田来说，国内螺杆泵采油存在的另一问题是空抽。由于地层供液能力有限，当液面降低，螺杆泵出现空抽现象时，其定子橡胶没有原油的润滑和散热，会迅速失效，这也是影响螺杆泵采油在国内特低渗透油田大范围应用的一个主要因素。

三、电潜泵系统

电潜泵（ESP）的全称为电动潜油离心泵，简称为电潜泵或者电泵，电潜泵是通过电动机以及多级的离心泵进入到采油井的原油液面下进行抽油的举升设备。电潜泵的工作原理：地面的电源通过一系列的如变压器、控制屏以及电缆将电能输送到井下的电动机中，通过电动机带动了多级离心泵的叶轮转动，从而将电能转换为机械能，同时将采油井中的油液提升到了地面。

电潜泵采油属于无杆举升技术。用油管将多级离心泵下入井内，地面电源通过潜油泵专用电缆输入井下潜油电动机，使电动机带动多级离心泵旋转产生离心力，将井中的原油举升到地面。

经过 20 多年的发展，国内目前已有胜利、中成等电潜泵专业生产厂 10 余家，技术基本能够自足。电潜泵目前主要用于井温小于 180°C 、产量大于 $30\text{m}^3/\text{d}$ 的油井、排水采气井等，包括直井、斜井或定向井。目前中国石油电潜泵井总数约 3000 口，平均检泵周期近 1000d，是检泵周期最长的机采方式。2015 年我国研制的电潜泵在 200°C 环境下平稳运行，标志我国电潜泵技术的进步。

国外电潜泵技术发展较早，研发了系统监控装置，实现了井下压力温度参数的在线测量和闭环控制技术。近年来在软件控制、耐温性能、配套工艺上进一步提升。斯伦贝谢 Hot-line 高温电潜泵耐温达 300°C ；贝克休斯新的高效气体处理装置使电潜泵能在 95% 含气的工况下正常工作，进一步提高了系统的适用性和可靠性。研发了连续油管下电潜泵工艺等，降低了作业成本和风险。

目前电潜泵采油的主要不足是对产量要求较高，由于特低渗透油田产量普遍偏低，因此其应用受到限制。

四、气举采油系统

气举采油是指当油井停喷以后，为了使油井能够继续出油，利用高压压缩机把天然气压入井下，使原油喷出地面。气举采油是基于“U”形管的原理，从油管与套管的环形空间，通过装在油管上的气举阀，将天然气连续不断地注入油管内，使油管内的液体与注入的高压天然气混合，降低液柱的密度，减少液柱对井底的回压，从而使油层与井底之间形成足够的生产压差，油层内的原油不断地流入井底，并被举升到地面。气举采油一般在油管管柱上安装 5~6 个气举阀，从井下一定的深度开始，每隔一定距离安装一个气举阀，一直安装到接近井底。

气举采油工艺可以分为连续气举采油工艺和间歇气举采油工艺。连续气举采油工艺主要针对油田油藏埋藏较深，气油比高的油井。连续气举需要对生产井进行动态分析和测试，设计合理的采油参数。间歇气举采油是根据实际需要和设计要求，人为地从地面周期向井内的油套环空中注入一定量的高压气体，这些高压气经井下气举阀进入到油管后，以气体段塞的形式举升油管内的液体段塞。对于特低渗透油藏，由于地层渗透率低，供液能力较差，单井产量普遍较低，在这些井上开展间歇气举采油比采用连续气举经济实用。

从 20 世纪 80 年代初，国内油田就引进了气举采油方式、并进行研究。首先在辽河油田、中原油田推广使用了气举采油技术，取得了良好效果。到 20 世纪 90 年代，我国的吐哈油田、塔里木的轮南油田又相继在新疆开展了气举采油技术的研究和应用。经过 30 年的发展，国内气举采油方案设计方法存在多样性。主要使用者包括中原油田、吐哈油田、冀东油田等，设计人员在熟悉基本设计方法和本油田特点的基础上开发自己的设计方法甚至设计软件。同时，国内一些专业软件公司开发出综合石油软件，其中包含气举采油方案设计。

气举的主要优点为：举升度可深达 3600m 甚至更深；产液量适应范围比较广泛，可适应各油田不同产液量的油井；适用于各类斜井、定向井；适用于产出液体中具有腐蚀介质的油井和各类出砂井；特别适应高气油比井；操作管理较简单，工作制度改变灵活。

气举的主要局限性为：必须有充足的气源；一次性投资比较高；适用于整个油田或整个区块集中生产，不适宜分散开采；安全性较其他采油方式差。

第三节 特低渗透油田有杆泵采油技术及发展趋势

一、存在问题

特低渗透油田有杆泵采油主要存在以下问题。

(1) 特低渗透油藏供液能力不足，抽油泵沉没度小，从而导致抽油泵泵筒内原油充满度偏低，地面示功图多为“刀把型”，如图 1-1 所示。为了对比，图 1-2 给出了高产油田的示功图，从图 1-1 和图 1-2 可以看出两者的区别。

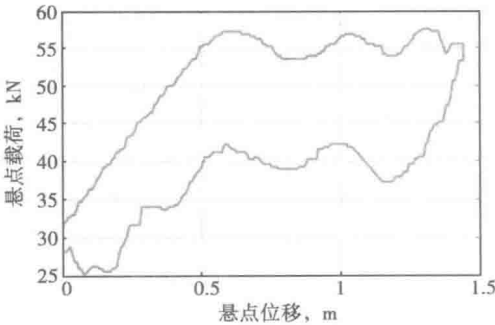


图 1-1 特低渗透油田典型示功图

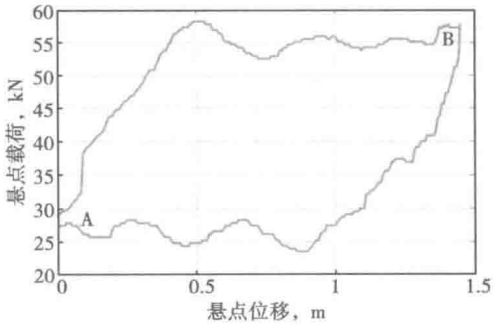


图 1-2 高产油田典型示功图

(2) 系统效率低。由于抽油泵充满度偏低，抽油泵泵效降低。抽油杆为细长杆，在往复运动中存在变形，使得抽油泵柱塞实际冲程小于地面抽油机冲程，也降低了抽油泵泵效。地面抽油机工作在轻载状态，抽油机效率降低。因此有杆泵系统总效率降低。例如国内典型

的特低渗透油田的低产井，其泵效小于 10%，极端情况下，有些油井泵效甚至小于 5%。有文献研究表明，若从经济角度考虑，当单次抽油量小于满抽的 19% 时，抽一杆油所消耗的成本价格高于抽上来的原油的价值。当油井供液能力继续降低时，抽油机将工作于空抽状态，油管不出油，抽油机做无用功，工作效率为零，光杆发热，甚至于被折断，给有杆泵设备造成故障。

(3) 杆管偏磨严重。为了提高特低渗透油田产量，目前井场大多采用丛式井或水平井。这些油井井斜角及方位角变化很大，普遍存在抽油杆和油管偏磨现象。再加上特低渗透油田会出现空抽现象，杆管接触面摩擦力增大，因而加剧了杆管偏磨现象。典型的抽油杆杆体偏磨情况如图 1-3 所示，抽油杆接箍偏磨情况如图 1-4 所示。

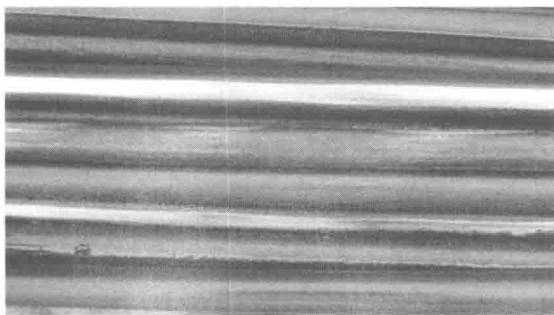


图 1-3 抽油杆杆体偏磨情况

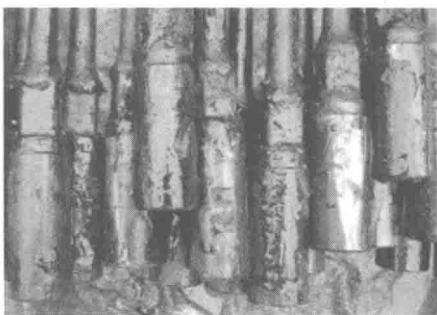


图 1-4 抽油杆接箍偏磨情况

二、特低渗透油田有杆泵采油新技术

为了克服特低渗透油田有杆泵采油的缺点，需要在以下几个方面进行研究。

(一) 机械采油方式优选

应用模糊数学理论建立特低渗透油田机械采油方式综合评价模型，对有杆泵、螺杆泵、气举等机械采油方式进行技术经济性综合评价，实现机械采油方式优选，降低生产成本。

(二) 有杆泵抽油设备技术经济性综合评价

针对有杆泵抽油设备数量多、投资大、设备选型不当等问题，采用模糊加权评判矩阵、一致性检验等方法，对特低渗透油田有杆泵抽油设备进行技术经济性综合评价研究，为设备选型提供科学依据。以节约企业设备投资和维护费用。

(三) 定向井抽油杆柱三维有限元力学性能研究

考虑到特低渗透油田的油井井斜角大、存在供液不足，以及抽油杆与油管中心线不共线等情况，建立更加符合实际的抽油杆柱三维有限元力学模型，提高杆管接触点预测精度，为杆管防偏磨研究提供理论基础。

(四) 有杆泵系统优化设计

采用最优化理论，针对特低渗透油田低产低效井产能状况，实现机杆泵的最佳匹配及冲程、冲次、泵径、下泵深度等工作制度最优化，制定合理的间抽制度，达到供排协调。

(五) 油井故障智能诊断技术研究

针对特低渗透油田的油井井下工况，采用示功图面积法、产量预测法、径向基神经网络、模糊识别等相结合的理论，建立特低渗透油藏油井工况智能诊断模型和方法，提高井下

故障识别率，实现油井生产动态管理。

（六）基于地面示功图的单井计量

通过地面示功图对特低渗透油田的单井产量进行预测，可以实现远程、实时、连续、自动计量。和常规计量方法相比，可节约大量人力、物力，有利于降低使用成本，尤其是在油井分散的井区，这种优势更为明显。目前，基于地面示功图单井计量方法主要局限在于计量精度低、稳定性差，如何提高单井计量精度是急需解决的问题。

三、发展趋势

当前特低渗透油田机械采油仍然以有杆泵采油为主，未来发展方向是：继续改进现有的杆泵采油技术以克服其缺点，同时开发新型无杆采油技术。

（1）改造现有的游梁式抽油机，研制长冲程、低冲次的立式抽油机，以提高系统效率。研发功率法调平衡、动态控制等技术，最大限度提高油井载荷与电动机载荷的匹配性，降低电量损耗。开发新型驱动电动机也是节能提效的有效途径，最新研制的永磁直驱电动机，去掉了皮带，直接驱动减速机构，减少传动效率损失。

（2）进行理论与实际研究，减少杆管偏磨问题的发生。从理论上进行杆柱三维力学性能分析，提高杆管接触点预测精度。开发高强度抽油杆、增油短节、扶正器和油管内衬，延长其运行周期。

（3）提高特低渗透油田油井况监测与智能化水平。通过油井工况监测与故障诊断技术，提高系统效率、降低开发成本并最大程度地提高产量。

（4）对于产量小于 $1.0\text{m}^3/\text{d}$ 的油井，开展间抽理论与应用研究，降低抽油机所做的无用功。

（5）发展新型的无杆采油技术，如电动潜油螺杆泵、电动潜油离心泵、井下直线电动机柱塞泵、气举法采油等。针对这些方法自身的缺点，进行技术研发，提高这些采油技术对于特低渗透油田的技术经济适应性，使其能够进行推广应用。

（6）提高特低渗透油田“功图法”单井产量计量精度。理论研究方面，通过新的算法，提高泵功图预测精度；设备方面，未来将研究通过在井下抽油泵安装位移传感器，直接读取柱塞行程，消除抽油杆对泵功图的影响。目前最先进的示功图诊断与单井产量计量相结合的“综合诊断法”油井计量技术也是未来的研究方向。

（7）利用新材料和新工艺解决传统手段难以解决的问题，能够使一些工况复杂恶劣的油井举升得以突破，实现原油的顺利开采，如复合驱、聚合物驱和三类油层三次采油技术，以及高温流体油井举升技术等。

