

刘义刚◎编著



渤海油田注水控水 工艺技术

新进展

BOHAI YOUTIAN

ZHUSHUI KONGSHUI GONGYI JISHU

XINJINZHAN



化学工业出版社

渤海油田注水控水 工艺技术

新进展

◎ 刘义刚 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书简要介绍了渤海稠油油田注水开发的现状及面临的诸多问题,对水处理方法、注入水水质控制技术、如何建立和实现优良的水质指标控制体系、注水控水新技术的机理、研究成果及现场应用效果等方面做了大量详尽的描述和系统的总结。本书可供海洋石油开发、开采技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

渤海油田注水控水工艺技术新进展/刘义刚编著. —北京: 化学工业出版社, 2013. 4
ISBN 978-7-122-16583-1

I. ①渤… II. ①刘… III. ①渤海-海上石油开采-注水(油气田) IV. ①TE357.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 031976 号

责任编辑: 李晓红

文字编辑: 刘砚哲

责任校对: 徐贞珍

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 16 字数 324 千字 2013 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

前言

随着海上稠油油田注水开发的深入，油田注水控水技术需求越来越迫切。地质油藏、采油技术人员紧密结合，积极应对海洋石油特殊开发模式下出现的新问题、新挑战，勇于实践，在注水油田开发开采技术方面积极探索，取得了一系列丰硕的成果。这些成果在改善海上注水油田开发效果，实现渤海油田“挖潜增产”、稳油控水方面，起到了非常重要的作用。

本书从渤海稠油油田注水开发的现状及面临的诸多问题、渤海海上油田的含油污水、海水、水源井水等的处理方法、注入水水质控制技术、如何建立和实现优良的水质指标控制体系、注水控水新技术的原理、研究成果及现场应用效果等方面，系统地介绍了渤海油田在注水控水技术方面所取得的研究及实践成果。

本书对海上油田注水控水技术研究应用具有借鉴作用和指导意义，可供从事海上油田开发开采工程技术人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

编 者

2012 年 9 月

目 录

第一章 油藏特征及其开发现状	1
第一节 绪论	1
第二节 油藏地质特征与流体性质	1
第三节 完井方式	8
参考文献	12
第二章 水源、水质标准和水处理方法	13
第一节 水源与水质标准	13
第二节 水处理方法	14
参考文献	17
第三章 水质控制技术与管理制度	18
第一节 多源水处理技术	18
第二节 水质控制技术	29
参考文献	39
第四章 分层注水工艺技术	40
第一节 概述	40
第二节 同心集成分层注水技术	41
第三节 地面多管分注技术	46
第四节 地面卧式电潜泵增压注水技术	57
第五节 海上同井分注分采技术	60
参考文献	62
第五章 注水井测试和洗井技术	63
第一节 分层测试技术	63
第二节 注水井不动管柱洗井技术	66

参考文献	75
第六章 注水井深部调剖技术	76
第一节 概述	76
第二节 技术难点	76
第三节 室内实验研究	78
第四节 现场实施情况	89
参考文献	98
第七章 弱凝胶调驱技术	99
第一节 概述	99
第二节 弱凝胶深部调驱技术	100
第三节 现场应用及效果	101
参考文献	112
第八章 纳米微球调驱技术	114
第一节 纳米微球调驱机理	114
第二节 现场应用及效果分析	115
第三节 QHD32-6A9、B14 井组应用情况	124
第四节 QHD32-6-C5、C21 井组应用情况	129
参考文献	136
第九章 氮气泡沫深部调驱技术	138
第一节 氮气泡沫调驱国内外技术现状	138
第二节 氮气泡沫调驱机理	142
第三节 起泡剂性能评价及其优选	146
第四节 数值模拟	155
第五节 矿场先导试验	163
第六节 结论与建议	167
参考文献	168
第十章 层内生成二氧化碳提高采收率技术	169
第一节 概述	169
第二节 层内生成二氧化碳提高采收率机理	182
第三节 油藏及室内实验研究	184
第四节 现场应用及效果	204

参考文献	221
第十一章 油井堵（控）水技术	222
第一节 概述	222
第二节 化学隔板与机械联合堵水技术	223
第三节 改性稠油堵水技术	228
第四节 氮气泡沫压锥控水技术	229
参考文献	250

第一章

油藏特征及其开发现状

第一节 绪 论

渤海海域稠油油田多，油田类型复杂，开采难度大，采油工程技术存在诸多难题和挑战，要实现年产 3000 万吨油气产量目标，必须通过采油新工艺技术的突破来实现老油田的挖潜。渤海油田在中海石油的“科技领先”战略的指引下，以稳油控水、实现油藏目标为出发点，坚持以“早注水、注好水、注够水、精细注水”为主线，以提高动用储量和单井产能为目的，以加快采油速度、提高采收率为指导思想，积极研究、应用稠油油田高效开发采油工艺技术、海上稠油油田提高采收率技术、海上油田复杂井治理技术等，这些技术的实施有效减缓了老油田的递减，不断提高了油田采收率，为实现 3000 万吨打下了坚实基础。

渤海稠油油田采油工艺方面存在诸多难题，渤海稠油油田采用注水开发，层内、层间矛盾突出，稳油控水难度大，主要包括：注入水窜进问题；边底水锥进问题；出砂及油层污染堵塞等问题；某些边部油井或区块，原油黏度高，注水开发效果差，经济风险增大。

因此，迫切需要通过有效的注水开发开采技术的研究及应用来实现稳油控水。

第二节 油藏地质特征与流体性质

一、SZ36-1 油田

SZ36-1 油田位于辽西低凸起中段，是一个在前第三系古潜山背景上发育起来的下第三系披覆构造。主力储集层为东营组下段，纵向上Ⅰ油组、Ⅱ油组是油田的主力油层。油藏类型为受构造控制、岩性影响的构造层状重质稠油油藏。

储层段主要发育有三角洲沉积亚相和三角洲间湾亚相。含油砂体大部分为三角洲前缘亚相所沉积的砂体组成，进一步可细分为水下河道微相、河口坝微相、远砂坝及前缘席状砂微相。储层孔隙度分布在 29%~35% 之间，渗透率分布在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 10 \mu\text{m}^2$ ，平均渗透率在 $3000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上。储层为疏松砂岩，孔隙以原

生粒间孔占绝对优势,喉道为缩颈喉道,储层孔喉半径主要分布在 $5\sim 63\mu\text{m}$,最大孔喉半径可达 $200\mu\text{m}$ 以上,储层以高孔(特)高渗疏松砂岩为主,次为中孔中渗储层。

油田地层水水型为 NaHCO_3 型, pH值 $7.5\sim 9.0$ 。地层水矿化度平均为 6071mg/L , HCO_3^- 平均含量高达 2084mg/L , CO_3^{2-} 含量为 231mg/L 。通过储层黏土矿物X衍射,结合扫描电镜和薄片观察表明,储层胶结物以泥质为主,平均含量为 9% ,黏土矿物主要为蒙脱石、伊利石和高岭石。伊/蒙混层为无序混层,相对含量平均为 40% ,蒙皂石百分含量 $>40\%$ 。蒙脱石呈薄膜状分布于颗粒表面,与外来流体接触面积大,易于发生敏感性损害。

综合储层敏感性实验评价结果和储层地质特征,预测注水过程中储层损害机理和类型如下。

(1) 储层的速敏损害程度为弱至中偏弱,渗透率平均下降 17.3% 。原始渗透率越高,储层的速敏损害愈弱,主要原因是高渗透层储层中黏土、杂基等微粒含量低,同时储层孔喉半径粗,而运移的微粒粒径较细,因此微粒不易形成桥堵。

(2) 储层的水敏性为强水敏,盐敏性为中等偏强,次地层水对地层的损害弱。综合盐敏/水敏实验,入井液的最佳矿化度 $4600\sim 35000\text{mg/L}$ 。

(3) 储层酸敏损害程度总体表现为中等偏弱,碱敏损害为中等偏弱。

国内外研究中类似SZ36-1油田疏松砂岩稠油油藏长期注水开发表明,长期注水岩石孔隙结构会发生以下的变化^[1]:储层孔隙中黏土矿物、泥质含量、碳酸盐含量以及地层微粒($<37\mu\text{m}$)被冲走或冲散,含量均有所降低,导致孔喉增大;油层的非均质进一步严重,高渗透、大孔道的部位或层位(段)形成注入水通道,为强水淹干扰区,而剩余油潜力区见不到注水效果,导致干扰进一步加剧。黄思静等(2000年)通过研究东部某油田沙河街组注水前后储层孔隙结构表明:从低含水期、中含水期到特高含水期,储层平均孔隙度由 33% 提高到 38% ,渗透率变化更大。中高含水期粉砂岩渗透率变化较小,而粉细砂岩的渗透率增大1倍左右;特高含水期渗透率增大10倍左右。喉道平均直径从注水开发前 $3.761\mu\text{m}$ 增至开发后的 $4.758\mu\text{m}$,喉道直径中值从开发前的 $4.661\mu\text{m}$ 增至开发后的 $8.115\mu\text{m}$ 。

SZ36-1油田疏松砂岩稠油油藏具有埋藏浅、压实程度低、胶结疏松、孔喉粗大、原油携砂能力强的特点,容易造成储层中微粒运移,架桥堵塞孔喉;同时外来杂质也易于进入储层,对储层深部造成损害。储层原油属于高黏度、胶质沥青质含量高、在开采过程中随温度及压力的降低,原油中气体逸出将引起油中蜡质析出,特别是油井转注水后,冷水进入使近井地带层内温度降低幅度变大,使得原油黏度增大和有机质在孔喉处结垢析出,形成“冷伤害”,造成孔喉堵塞、注水困难。根据储层敏感性矿物和储层地质特征综合分析,综合分析表明注水过程中SZ36-1油田储层损害类型强弱顺序为:水敏、速敏、冷伤害、外来固相堵塞、无机垢。

SZ36-1油田采取滚动式开发模式,分Ⅰ期和Ⅱ期,其中Ⅰ期(包括AⅠ、AⅡ、

B、J 四个平台) 从 1993 年到 1997 年陆续投产; II 期(包括 D、E、F、C、G 和 H 等 6 个平台) 分别从 2000 年 11 月到 2001 年 11 月陆续投产。至 2008 年 12 月, 全油田总井数 268 口, 其中水源井 10 口。I 期总井数 68 口井, 其中油井 48 口, 注水井 18 口, 水源井 2 口; II 期总井数 200 口井, 其中油井 149 口(2008 年新增调整井 6 口), 注水井 43 口, 水源井 8 口。

二、LD 油田群

1. LD4-2 油田

LD4-2 油田位于渤海辽东湾海域, 东与绥中 36-1 油田紧邻, 区域构造上, LD4-2 油田位于辽东湾海域辽西凹陷中段, 东侧紧靠辽西低凸起, 属于辽西 1 号断层下降盘上的一个断块构造。

LD4-2 油田构造为一个复合断块, 构造走向近北东, 其东侧和南侧均以辽西 1 号断层为界, 西侧呈缓坡向凹陷过渡, 构造长 12.0km, 宽约 5.0km。辽西 1 号断层走向近北东, 延伸长度达 100km 以上, 在新生界地层的最大断距达数千米, 是分割辽西凹陷和辽西低凸起的边界大断层。依据现有的二维地震资料, 油田范围内, 共解释出 12 条内幕断层, 根据断层的产状, 大致可分为两组, 一组断层近东西向分布, 延伸长度 0.8~5.4km, 东二下段地层的平均断距 10~80m, 该组断层将旅大 4-2 构造由北至南分割成 4 个断块, 其中 2 号断块为主要含油区; 另一组断层主要发育在 4 号断块的南缘, 与辽西 1 号断层呈平行展布, 延伸长度 2.5~3.5km, 东二下段地层的平均断距 20~30m。

地面脱气原油分析结果表明, LD4-2 油田地面原油属于中质原油, 具有低黏度、低含蜡量、低含硫量、低凝固点, 以及胶质沥青质含量中等的特点。

PVT 分析结果, 地层原油密度 $0.816 \sim 0.828 \text{g/cm}^3$, 饱和压力较高, 为 13.61~14.97MPa, 地饱压差小, 为 0.99MPa (综合分析, DST1 样品代表性较差, 不反映四油组的特征), 地层原油黏度 $3.5 \sim 4.1 \text{mPa} \cdot \text{s}$, 原始溶解气/油比中等, 为 $58 \sim 61 \text{m}^3/\text{m}^3$ 。

2. LD5-2 油田

LD5-2 油田位于渤海辽东湾海域, 与绥中 36-1 油田紧邻。区域上, LD5-2 油田位于辽东湾海域辽西凹陷中段, 东侧紧靠辽西低凸起, 属于辽西 1 号断层下降盘上的一个断块构造。该构造为一复合断块, 构造走向近南北, 其东侧和北侧均以辽西 1 号断层为界, 西侧呈斜坡向凹陷倾没, 构造南北长 5.5km, 东西宽 3.5km。

辽西 1 号断层形成时间早, 规模比较大, 对构造和沉积起一定的控制作用, 在本区该断层分为两支即南支和北支。南支近北东走向, 为旅大 5-2 构造和绥中 36-1 构造的分界断层, 东二段平均断距达 200m, 延伸长度较远, 向南超出工区范围, 工区内 8.5km; 北支近东西转北东走向, 是旅大 5-2 构造的北边界, 东二段平均断距达 300m, 延伸长度较远, 北东方向超出工区范围, 工区内 7.5km。

常规物性分析样品统计表明,东二上段物性较好,孔隙度主要分布在32%~40%之间,渗透率一般大于 $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。东二下段孔隙度主要分布在30%~36%之间,渗透率分布范围 $(10 \sim 1320) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要集中在 $(100 \sim 1000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

根据压汞资料,毛管压力曲线特征表现为分选好,中等,粗-略细歪度。排驱压力0.003~0.2MPa,饱和度中值压力0.02~9.5MPa,最大进汞量60%~97%,平均孔喉半径为0.8~27 μm 。根据DST、地层温度和地层压力测试资料,LD5-2油田压力梯度约1.0MPa/100m,温度梯度约3.3 $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,为正常的温度和压力系统。

地面脱气原油样品分析表明,LD5-2油田地面原油为重质油,具有密度大、黏度高、胶质沥青质含量中等、含蜡量低、凝固点低等特点。

LD5-2油田只在LD5-2-1井东二下段取到1支合格地层水样,实验室分析结果,地层水总矿化度为5491mg/L,水型为重碳酸钠型(NaHCO_3)。

3. LD10-1 油田

LD10-1油田位于辽东湾地区辽西低凸起的中段,西侧紧邻辽西凹陷,是渤海最有利的油气富集区之一,具有良好的油气富集成藏的石油地质条件。东北距绥中36-1油田中心平台约24km,西边界为辽西1号断层,东南呈缓坡向凹陷过渡,平均水深30m,平均温度10.3 $^{\circ}\text{C}$ 。

LD10-1油田构造是一个在古潜山背景上发育起来的断裂半背斜,近北东走向,西北边界为辽西1号断层,东南侧呈缓坡向凹陷过渡,油田范围内,断层不甚发育,构造较为完整。辽西1号断层呈北东走向,是分割辽西低凸起和辽西凹陷的边界大断层,在油田范围内呈弧形挠曲,目的层段断距为150~250m,该断层对LD10-1油田的构造演化及沉积起着明显的控制作用。

区域沉积相研究认为,渤海辽东湾地区在东营组东二段沉积时期为一湖盆环境,三角洲沉积体系比较发育,LD10-1油田地区主要接受来自北西向古水流携带泥砂的沉积。油田主体区主要发育三角洲前缘亚相,沉积物源来自北偏西方向。根据单井相分析,可细分为水下分流河道、河口坝和分流河道间三个微相。水下分流河道微相:岩性为浅灰色粗、中、细砂岩,分选中等,磨圆次圆至次棱状;沉积构造主要为块状层理及平行层理,正粒序;粒度分析,C-M图由Q-R-S段组成,代表牵引流沉积;粒度概率曲线主要为两段式,由跳跃和悬浮段组成;GR及SP曲线呈齿状钟型及箱型。河口坝微相:岩性主要为灰色细砂岩及中砂岩,分选中等,磨圆次棱至次圆状;GR及SP曲线呈齿状漏斗型,地震剖面上见“S”斜交前积反射,砂岩段具反粒序沉积特征。分流河道间微相:岩性主要为粉砂质泥岩及浅灰色粉砂岩。沉积构造主要为水平层理及波状层理,与水下分流河道一起发育。

综合分析认为,零、一油组储层以水下分流河道、河口坝沉积为主,分布较稳定;2井区二油组储层属于水下分流河道和河口坝的叠置复合体,砂体非常发育,

在油田范围内大面积分布,但砂层厚度变化较大(10~67m);三、四、五油组受古地形影响,主要发育在油田的西北侧,且砂层横向变化较大;3井区为水下分流河道沉积。砂体在平面上分布稳定,连续性较好。

LD10-1油田水分析结果见表1-1,水源井水为氯化钙型,总矿化度平均为9028mg/L, pH值为6,略偏酸性;地层水为碳酸氢钠型,矿化度平均为2627~2873mg/L, pH值7.0~7.5。产出液混合污水总矿化度为8628mg/L,为氯化钙型。

表 1-1 旅大 10-1 油田地层水水质

井 号	生产层位	K ⁺ +Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	总矿化度	pH 值	水型	备注
1w	Ng	2546	189	681	5557	38	168	0	9180	6	CaCl ₂	水源井水
3w	Ng	2419	185	698	5388	29	159	0	8877	6	CaCl ₂	
A18m	二油组	1032	10	0	744	38	656	393	2873	7	NaHCO ₃	地层水
		967	0	0	399	0.4	635	588	2627	7.5	NaHCO ₃	
混合污水		2372	170	661	5158	29	229	229	8628	6	CaCl ₂	配聚用水
备注		水样取样日期为 2005. 2. 21,分析日期为 2005. 3. 4,单位 mg/L										

三、BZ 油田群

渤南油气田位于渤海海域的西、南部地区,由沙东南构造带和渤南凸起上的多个油气田所组成,其中沙东南构造带位于沙垒田凸起向东南方向延伸的倾没端上,呈北西-南东方向展布,其西侧是沙南凹陷,东侧是渤中凹陷。渤南凸起位于渤中和黄河口凹陷-庙西凹陷之间,是一个呈近东西向展布的构造带,由于受到郯庐断裂在海域延伸部分的影响而被分割成东西分布的三段,其中 BZ26-2、BZ25-1、BZ28-1 等位于渤南凸起西段之上,BZ28-1、BZ29-3 等处于中段,PL19-3 油田位于渤南凸起的东段。因此,渤西南地区是渤海海域油气最富集的地区之一。

1. BZ28-1 油田

BZ28-1 油田自上而下钻遇了新生界第四系,上第三系明化镇组和馆陶组,下第三系东营组和沙河街组,古生界奥陶系上马家沟组、下马家沟组、亮甲山组、冶里组和寒武系凤山组、长山组、崮山组、张夏组、徐庄组、毛庄组、馒头组及府君山组等地层。

BZ28-1 油田含油层系为沙河街组沙一、沙三段砂砾岩储层,奥陶系下马家沟组、亮甲山组、冶里组和寒武系凤山组、长山组、毛庄组、馒头组及府君山组等碳酸盐岩孔隙-裂缝型双重介质储层。BZ28-1 油田存在着两种不同类型的储集层:即沙河街组砂砾岩以粒间孔为主的孔隙型储集层和奥陶系、寒武系碳酸盐岩孔隙-裂缝型双重介质储集层。

2. BZ26-2 油田

BZ26-2 油气田位于渤海南部海域，东距 BZ28-1 油气田 32km。油气田所处海域平均水深 22m，年平均气温 13.6℃。

BZ26-2 油田钻遇地层自上而下分为第四系地层、上第三系明化镇组和馆陶组、下第三系东营组和沙河街组及太古界，含油层系为明下段油组（Nm_L）、馆陶组（Ng₀₁、Ng₀₂、Ng I、Ng II、Ng III 和 Ng IV 油组）、东营组二段（E_{3d2}）、沙河街组二段（E_{3s2}）和太古界（Ar）潜山等 10 套油气层。主力油藏为 Ng I、Ng IV 和 E_{3s2} 油组，主力气藏为太古界潜山气藏。

BZ26-2 构造是一个由断裂控制的披覆半背斜构造，构造形态受其两侧东西向边界断层的控制。呈南北两侧断层夹持的垒块山，东西方向下倾明显，北侧以断层为界，断面很陡，倾角大于 65°；南侧断面（古断剥面）相对平缓，可见明显的地层超覆不整合，潜山顶面形态西陡东缓，南高北低；沙河街组储层顶面构造分为南、北两个高点，高点之间以鞍部相连；构造幅度相对较陡，构造北高点以地层超覆为特征，南高点呈披覆背斜；由于两侧受东西向大断层夹持，由东营组顶面至 Ng₀₂ 油组顶面的构造均以半背斜形式存在，构造幅度逐渐平缓，构造走向近东西向；Ng₀₁ 油组顶面至明下段顶面构造也为半背斜，但构造幅度更缓，并且具南、北两个高点的特征。

BZ26-2 油田明下段至沙二段油组，纵向上随深度的增加，油质略为变差。地面原油密度 0.817~0.874g/cm³，原油黏度 2.5~12.66mPa·s，含硫量 0.04%~0.17%，含蜡量 4.42%~15.4%，胶质含量 13.0%~23.5%，沥青质含量 0.8%~7.8%。

地层水总矿化度为 12204~17713mg/L，水型主要为 NaHCO₃ 型。

3. BZ13-1 油田

BZ13-1 油田位于渤海中部海域，油田范围内平均水深 23m。该构造潜山面为一大型的鼻状构造，向北倾斜。沙一段生屑云岩直接披覆在潜山面之上，构造面貌清晰。整个构造主体形态为披覆背斜构造，地层整体北倾，受断层切割，整个构造自北向南节节下掉。

BZ13-1 油田地层自上而下依次为第四系平原组，上第三系明化镇组、馆陶组，下第三系东营组、沙河街组和中生界。主要目的层段为沙一段底部发育一套厚约 16m 的生屑云岩储层。主要储层段为沙一段底部地层，储层厚度为 16~25m，1 井和 2 井为生屑云岩及云质砂砾岩，3 井为云质泥岩和砂砾岩，说明储层厚度变化不大，但储层之间的岩性变化较大。沙一段储层主要有三种岩石类型，即生屑云岩、云质砂砾岩和砂砾岩。生屑云岩储层为一套浅水湖相碳酸盐岩沉积。共划分为 4 个亚相：即砾石滩亚相、粒屑滩亚相、生物滩亚相和泥晶滩亚相。据取心井的岩性剖面建立其垂向沉积层序：相序由下至上分别为砾石滩亚相、粒屑滩亚相、生物滩亚相和泥晶滩亚相，水动力能量依次减弱，反映水进沉积旋回。

4. CFD18-2 油田

CFD18-2 油田位于渤海西部, 油气田范围内平均水深约 22.6m。CFD18-2 构造系在太古界潜山背景下, 由下第三系逐渐超覆形成的一个潜山披覆构造, 剖面上具较明显的上缓下陡、顶薄翼厚的披覆特征。整个构造分为东、西两个高点, 西高点为一个完整的狭长形背斜, 轴向近南北, 构造简单, 断层不发育。东高点为一个被断层复杂化的穹隆状背斜, 东以一条东倾大断层为界, 西以一条西掉断层与西高点相隔, 北翼地层下倾明显, 南翼地层总体南倾。受断层影响, 形成三个呈环形展布的局部高点, 并在东南翼局部形成近南北向沟谷。CFD18-2 油气田由两类不同岩性地层构成的两种不同性质储集层: 一类是东营组底部砂砾岩储层; 另一类是太古界潜山基岩储层。两种储层在空间上叠置, 构成复合式储集体 (东高点)。

东高点地面原油密度为平均 $0.8284\text{g}/\text{cm}^3$, 西高点为 $0.850\text{g}/\text{cm}^3$ 。西高点其他指标如含蜡量、胶质沥青质含量和凝固点等也比东高点高。总体来看, CFD18-2 油气田原油为质量好的轻质原油, 且东高点地面原油性质好于西高点。

四、JZ9-3 油田

JZ9-3 油田距锦州 20-2 凝析气田约 22km, 构造上 JZ9-3 油田位于辽东湾凹陷, 辽西低凹陷的北端, 介于辽西凹陷的北洼与陆地西部凹陷清水沟洼陷之间, 是在新生界基底上形成的北东向南西展布的下第三系披覆半背斜构油田。油田于 1999 年 10 月底投产, 自上而下主要钻遇的层系为第四系平原组, 上第三系明化镇组、馆陶组, 下第三系东营组、沙河街组及中生界地层。东下段储层为油田的主力储层段, I~III 油组为油田的主力油组。

JZ9-3 地区东下段时期三角洲沉积十分发育, 目前钻井揭示的三角洲沉积亚相有: 三角洲前缘和前三角洲。其中三角洲前缘亚相又分为水下分流河道、水道间湾、河口砂坝及远端砂坝四个微相。以中-细砂岩、粉砂岩为主。岩石颗粒分选、磨圆较好, 石英含量较高。纵向上反旋回沉积特征明显, 发育大量三角洲沉积中常见的沉积构造。

此外, 局部井段见扇三角洲沉积, 主要发育扇三角洲前缘亚相中的水下分流河道和河口砂坝微相。岩性主要以砂砾岩、含砾粗砂岩为主, 砾石最大直径达 6cm, 颗粒分选较差, 混杂堆积, 见植物树干。

区域上, JZ9-3 构造实质上是陆地辽海中央凸起带向西南方向在辽西凹陷的浸没端。该凸起北东较高, 而南西较低。区域沉积相研究结果认为该区域古水流方向为北东至南西向。北东向古水流在本区形成由北东向南西不断推进的三角洲和扇三角洲沉积, 在平面上表现为水下分流河道-河口砂坝-远端砂坝等微相的相互叠置。由于河流的不断改道, 使得砂体叠合连片, 连通性较好。

水样分析资料 (见表 1-2) 表明, JZ9-3 油田馆陶组地层水 (清水) 为 Na_2SO_4 型, pH 值为 6.5, 总矿化度为 $1250\text{mg}/\text{L}$ 。东下段储层地层水为 NaHCO_3 型, pH 值为 7.5, 总矿化度为 $6500\text{mg}/\text{L}$ 。

表 1-2 地层水分析

井号	层位	取样深度 /m	K ⁺ +Na ⁺ /(mg/L)	Mg ²⁺ /(mg/L)	Ca ²⁺ /(mg/L)	Cl ⁻ /(mg/L)	SO ₄ ²⁻ /(mg/L)	HCO ₃ ⁻ /(mg/L)	CO ₃ ²⁻ /(mg/L)	总矿化度 /(mg/L)
W2	Ng		354	7	76	541	29	241	0	1248
JZ9-3-5	Ed	1725~ 1734	2190	39	52	2482	96	1501	132	6491
			2098	39	92	2393	—	1641	138	6401

第三节 完井方式

渤海油田主要采用优质快速钻完井，适度防砂，采用“裸眼+筛管”或“套管射孔+筛管”简易防砂完井。如绥中 36-1 油田二期试用隔板传爆技术，该技术能够解决射孔后枪内憋压造成拆卸困难问题。渤中 25-1 油田引入平衡射孔大负压返涌放喷技术，并实现一趟管柱多层压裂充填防砂。

一、套管完井

套管完井是一种基本的完井方式^[2]，这种方式可有效封隔含水夹层、易塌夹层、气顶和底水；完全分隔和选择性射开不同压力、不同物性油气层，避免层间干扰；实施分层注采和选择性增产措施。

1. 射孔

埕北油田从国外引进油管输送射孔枪负压射孔技术，简称油管输送射孔技术（TCP 射孔）。该技术利用油管将射孔枪下到油层进行射孔，选用高性能、强穿透力的聚能喷流射孔弹获得最大射入深度和孔眼尺寸。该技术具有大孔径（18.30mm）、高孔密（39 孔/m）特点。实现 60°相位，射开面积为 $11.10 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 。防砂投产内测得平均表皮系数为 1.37。该技术解决了大斜度定向井、水平井电缆下入困难的问题。渤中 34-2/4 合作油田及锦州 20-2、锦州 9-3、秦皇岛 32-6 等自营油田均采用这种射孔方式。

渤中 34-2/4 油田根据定向井射孔段长的特点，选用 TCP 射孔方式，首次使用双管对向 120°射孔技术。通过试验，当射孔枪外径与套管内径间距为 1in^① 时，射孔枪对中效果最佳，且能发挥射孔弹聚能效果。该油田生产井 9%in 套管内选用 7in 射孔枪，配以无碎屑或低碎屑射孔弹。

绥中 36-1 油田二期试用隔板传爆技术^[3]。该技术在射孔枪接头上增加隔板传爆火药及泄压阀等装置，靠传爆装置传递爆轰能量。保证传爆效果的同时使空枪与装弹射孔枪完全密封隔离，保持空枪两端密封不进入井液。该技术用于 SZ36-1-C7 井的两层射孔作业。该井共用 8 个隔板接头，整个作业过程正常，射孔发射率

① 1in=0.0254m，全书同。——编者注

100%，夹层空枪内未进入油污。2002年，秦皇岛32-6油田C、D、E、F平台一次多层射孔作业中使用该技术，有效缩短了射孔时间，同时达到安全、环保、可靠的要求。

歧口18-2油田使用聚能复合火药，用于P3井全部射孔段、P4井部分射孔段。在同一射孔枪身内设置两种不同性质火药，一种用于射孔弹进行射孔，另一种用于复合固体推进剂进行压裂。在引爆时控制其瞬态时间差，实现射孔与压裂分步进行，对近井地带形成孔缝结合型渗流通道。

渤中25-1油田C平台引入平衡射孔大负压返涌放喷技术。该油田主要目的层为明化镇组下段，砂岩含量高，胶结性差。采用常规TCP大负压射孔容易发生地层砂埋枪风险。在疏松砂岩中，长井段射孔需保证射孔枪质量，选择合适的负压值，同时防止砂卡射孔枪。一期开发井射孔负压值为150psi^①，负压返涌放喷时负压值控制在800psi。这种压差下对地层进行有效抽吸，清除射孔孔道的残渣。该技术能缓解对油气层产生的损害，有利于提高单井产能。

目前，海油气区射孔器材基本实现国产化，同时开发出适应疏松砂岩储层及砾石充填要求的大孔径、高孔密、低碎屑射孔弹。渤海油气区射孔工艺从第一口套管生产井开始，经过对射孔方式、射孔工艺、射孔参数选择、点火方式以及作业程序的完善和改良，形成了一套完备的射孔工艺技术。

2. 防砂

埕北油田首次引进美国哈里伯顿公司的先期防砂技术，采用大孔径、高孔密、负压射孔工艺配合管内砾石循环/挤注充填防砂技术^[4]。该技术防砂效果好，平均有效防砂周期超过20年。该油田两座平台生产井全部采用砾石充填技术，自油田投产以来没有因为出砂导致修井和生产流程损坏问题。

埕北、绥中36-1（一期）、歧口17-3、歧口18-1油田先后引入逐层充填技术（STACK PACK）。在充填之前进行酸液预处理工艺，采用循环充填方式。埕北油田采用陶粒作为支撑剂，随后采用了石英砂。该技术可延长油井有效防砂周期，但单井充填工期较长，平均每3层需14.30天，成本较高。

锦州9-3油田引入贝克·休斯公司一次多层充填防砂技术（ONE TRIP）。该油田生产井采用绕丝筛管砾石充填防砂，用石英砂作为支撑剂。注水井和水源井采用优质筛管防砂。该技术防砂各层必须等长，未能解决井下管柱的配管问题。

歧口17-2油田引入哈里伯顿公司两趟管柱多层防砂技术（DUAL TRIP），并用于绥中36-1二期和秦皇岛32-6油田完井作业中。

截止到2002年，一次多层充填防砂技术（ONE TRIP）用于绥中36-1油田二期和秦皇岛32-6油田300余口井。筛管选用绕丝筛管和优质筛管两种，用石英砂作为支撑剂。绥中36-1油田二期使用盐水代替胶液携砂，避免胶液污染。同时采

① 1psi=6894.76Pa，全书同。——编者注

用大排量高速水充填,解决了砂桥问题。

旅大 10-1、旅大 4-2、旅大 5-2、南堡 35-2 油田采用套管射孔,金属棉/编织网类型优质筛管防砂完井方式。优质筛管防砂比砾石充填防砂拥有更小的表皮系数,有利于提高油井产能。两个油田初期生产效果较好,生产一段时间后发生过滤介质堵塞或冲蚀损坏,导致油井出砂。优质筛管防砂一般用于注水井、水源井或油品性质好、储层泥质含量低的生产井。

渤中 25-1 油田二期项目采用哈里伯顿公司 STMZ 一次多层防砂压裂技术。通过调节压裂参数,合理控制充填系数和充填砂比,防砂作业达到预期效果。F 平台生产井通过压裂提高了产能。

二、裸眼完井

裸眼完井方式可使油气层完全裸露,具有最大渗流面积。该方式不能避免层间干扰,也不能有效实施分层措施。这种方式适用于岩性坚硬、井壁稳定、无气顶或底水、无含水夹层的块状碳酸岩或硬质砂岩油藏和层间差异不大的层状油藏。

1. 筛管简易防砂

2000 年前,渤海油气区裸眼井数较少。运用砾石充填防砂的套管井生产一段时间后,表皮系数增大,油井产能降低,在这种背景下产生了“适度防砂”理念。随着“多枝导流、适度出砂”的提出,渤海油气区采用裸眼完井的井数增多,大部分为水平井/水平分支井,少数为裸眼定向井。

2002 年,裸眼防砂井开始采用“裸眼+优质筛管”方式完井,称为简易防砂完井^[5]。简易防砂完井方式相比压裂充填防砂、砾石充填防砂、预充填筛管防砂表皮系数最小。使用优质筛管进行简易防砂操作简单、施工便利、作业周期短、油井初期产量高。

2003 年,蓬莱 19-3 油田进行多种完井方式,包括裸眼膨胀筛管完井、裸眼优质筛管完井、管内压裂充填+膨胀筛管完井。

2003~2005 年,渤中 25-1 油田、旅大油田群和南堡 35-2 油田的水平井/水平分支井采用星孔优质金属棉筛管简易防砂。Stars 公司星孔筛管以单层厚壁优质无缝钢管做基管,滤砂件采用 SS304、SS316 材料,每个过滤单元相对独立(图 1-1)过滤材料主要有金属棉和编织网。该筛管防砂相比砾石充填防砂具有更小表皮系数。地层砂分选差、泥质含量高或油质较稠的井在生产一段时间后容易发生过滤介质堵塞或冲蚀损坏,导致油井出砂。

2005 年,旅大 10-1 油田 A35m 井首次使用梯级优质筛管完井(图 1-2)。水平井/水平分支井由于水平段内压力分布缘故,容易出现水淹或气窜,从而影响油井产能,甚至造成油井提前关闭或报废。梯级优质筛管完井改变了水平井段井底压力场分布,实现充填砂沿水平段井底流动剖面的均匀推进,延缓了底水或气顶的锥进。