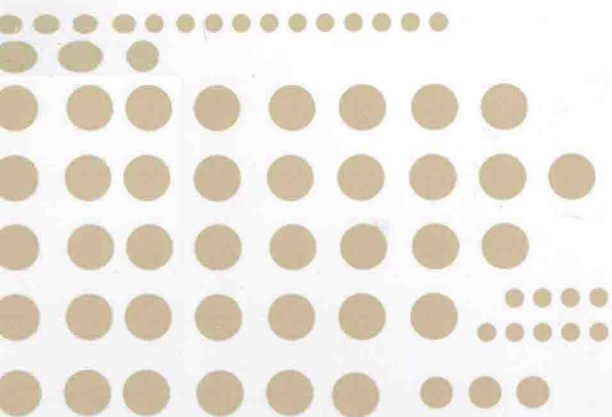




渤海油田防砂技术

邓建明 编著



石油工业出版社



渤海油田防砂技术

邓建明 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了渤海油田的防砂技术发展历程、防砂理念、防砂设计、施工工艺,以及不同技术在典型油田的应用情况,并对海洋石油防砂技术的发展趋势进行了展望。本书以实用技术为主,对安全、优质、高效地从事防砂完井作业具有很好的指导和借鉴作用。

本书可作为从事海洋石油钻完井专业的设计、技术管理人员,以及现场施工人员的参考书,亦可作为石油院校师生和钻完井相关行业科技人员参考和培训的技术资料。

图书在版编目(CIP)数据

渤海油田防砂技术 / 邓建明编著.

北京:石油工业出版社,2013. 5

ISBN 978 - 7 - 5021 - 9540 - 3

I. 渤…

II. 邓…

III. 渤海 - 海上油气田 - 油井防砂

IV. TE358

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 064175 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 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

编辑部:(010)64523537 发行部:(010)64523620

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

2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:10. 75

字数:257 千字

定价:58. 00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

中国海洋石油工业的发展经历了对外合作、自营合作、自主创业、自营开发四个阶段,目前已进入高速增长期。2010 年中国海洋石油总公司实现国内年产 $5000 \times 10^4 \text{t}$ 的宏伟目标,建成了“海上大庆”油田,标志着海洋石油已成为国家最现实、可靠的能源接替区之一。目前我国海域的油气产量已占全国油气总产量的 $1/4$ 。渤海油田作为中国海上最大的油田,油气产量于 2010 年达到 $3000 \times 10^4 \text{t}$,占中国海洋石油总公司国内总产量的 60%,成为原油产量仅次于大庆油田的全国第二大油田,是中国海洋石油总公司“海上大庆”的主战场。

在海洋石油工业飞速发展的过程中,钻完井技术产生了重大飞跃,为海洋石油的增储上产作出了巨大贡献。钻完井作业贯穿于油田勘探、开发、生产的始终,是高风险、高投入和高技术的行业。历经几十年的发展,渤海油田钻完井专业不仅创造了优快钻完井技术,使之成为渤海油田高效快速开发的重要推手,也形成了以“优快”精神为代表的思想精华,并且成为渤海油田钻完井乃至整个油田事业发展的重要方针。

完井是衔接钻井和采油而又相对独立的技术,也是油藏开发需要密切结合的关键点。完井技术水平的高低和施工质量的优劣,对油气井产量和油田开发的经济效益有决定性的影响。由于海上油田地层胶结疏松,稠油比例大,所以防砂工艺成为有效提高单井产能和维持油田正常开发的重要技术措施。

自 20 世纪 80 年代以来,随着海洋石油的开发,为了满足不同油层开采的需要,防砂工艺技术也在不断地发展和完善,已经形成了一系列适应不同地质条件和井况的防砂工艺技术。这其中包括适度防砂理念及技术、“量体裁衣”式防砂完井设计、优质筛管简易防砂技术、一次多层砾石充填工艺技术等。本书是根据渤海油田防砂技术的发展及应用现状,结合近年来国内外防砂技术的最新研究成果,本着实用、先进的原则进行编写的。

在本书编写过程中,中国海洋石油总公司工程技术部姜伟、张春阳、谢梅波、孙东征等同志提供了技术指导,中海石油(中国)有限公司天津分公司刘良跃、范白涛、马英文、张晓诚、刘小刚等同志提供了大量的技术资料和指导;中海石油(中国)有限公司北京研究中心周建良、王平双、刘书杰、何保生、文敏、武广媛等同志提供了大量的技术资料和指导,中海油能源发展股份有限公司中海油监督监理技术分公司杨立平、陈建兵、陈胜宏等同志提供了大量的技术资料和帮助,在此表示衷心感谢。

杨进、赵少伟等同志参加了本书部分内容的编写工作,张磊、李佳等同志参加了本书资料的整理工作;在本书编写和出版过程中得到了中国石油大学(北京)、中海石油(中国)有限公司天津分公司,中海石油能源发展股份有限公司监督监理技术分公司等单位的大力支持,在此表示感谢。

由于当今钻完井技术发展较快,加之编者的水平有限,本书难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 渤海稠油油田储层特征及防砂技术的发展历程	1
第一节 渤海典型稠油油田储层特征	1
第二节 渤海稠油油田开发模式和防砂技术的发展历程	11
第二章 适度防砂理念及其在渤海油田的应用	15
第一节 疏松砂岩出砂机理与预测方法	15
第二节 适度防砂提高产能机理	40
第三节 渤海油田防砂方式优选方法	48
第四节 渤海油田防砂方式统计	70
第五节 渤海油田不同防砂方式下产能分析	71
第三章 防砂工艺参数设计	95
第一节 地层砂特性分析方法	95
第二节 砾石充填防砂工艺参数设计	96
第三节 优质筛管挡砂精度设计方法	116
第四节 防砂质量要求	120
第四章 裸眼井防砂工艺	122
第一节 裸眼井滤砂管防砂	122
第二节 裸眼井砾石充填防砂工艺	123
第三节 裸眼井砾石充填工艺在 SZ36-1-L11H 井的应用	125
第五章 管内砾石充填防砂工艺	131
第一节 砾石充填工艺原理	131
第二节 砾石充填防砂工艺	132
第三节 一次多层砾石充填工艺	148
第四节 改善斜井砾石充填效果的措施	152
第五节 一次多层砾石充填防砂工艺在 SZ36-1-K16 井的应用	153
参考文献	162

第一章 渤海稠油油田储层特征及防砂技术发展历程

第一节 渤海典型稠油油田储层特征

中国海上油田已发现原油地质储量 $49 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中稠油储量为 $34 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总地质储量的 69% 以上。我国海上稠油油田及含油气构造主要分布在渤海湾新生代含油气盆地, 该盆地是中国目前累积探明石油地质储量最多的含油气盆地。海域面积 $7.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中有利油气勘探面积约 $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。渤海湾盆地是华北盆地向渤海海域的延伸, 以古近—新近系陆相沉积为主, 最大厚度 10000m, 总面积 $5.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 到目前共发现各类含油气田构造 100 个。截至 2010 年底, 渤海海域稠油油田数量多达 29 个(其中已开发 21 个), 地质储量 $32.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

渤海稠油油田的地质油藏特征有许多共同之处, 但也有一定差异, 主要由于储层的沉积相不同, 导致储层在平面上以及剖面上变化的复杂程度不同, 进而影响到油田开发模式的不同。

渤海海域油田为陆相沉积, 主要包括湖泊三角洲相油田(以 SZ36-1 油田和旅大 5-2 油田为代表)、辫状河三角洲相油田(以埕北油田为代表)、河流相油田(以秦皇岛 32-6 油田、PL19-3 油田、曹妃甸 11-1 油田和 NB35-2 油田为代表)和浅水三角洲相油田(以 BZ25-1 南油田为代表)四类, 陆相沉积的多层非均质特征和平台开发环境是对渤海海域油田经济高效开发的天然挑战。油藏地质条件复杂是渤海海域含油气构造的一大特点, 主要表现为下列几点。

(1) 储层复杂: 储层类型多, 复杂程度高, 储层主要为古近系沙河街组、东营组及新近系馆陶组、明化镇组砂岩, 其次还有沙河街组陆屑碳酸盐岩和古生界碳酸盐岩、中生界火山岩及古潜山混合花岗岩, 多数油藏含油层数多、含油井段长。

(2) 构造复杂: 构造形式多样, 既有大型披覆背斜构造油气藏, 又有复杂断块及潜山油气藏, 油气藏断层多, 断块面积大小不一。

(3) 流体性质复杂: 含油气构造流体性质变化范围大, 地下原油黏度为 $0.4 \sim 500 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 既有以 JZ20-2 油田为代表的凝析油田, 又有以 SZ36-1 油田为代表的常规稠油油田, 更有以 NB35-2 油田为代表的超常规稠油油田。

(4) 油气水关系复杂: 各含油气构造由于储层多、断块多, 各油藏、各断块均有多个油水、油气界面, 大部分油藏存在气顶, 有的气藏存在油环或底油。

(5) 胶结疏松、油井出砂严重: 油藏以细砂、粉细砂为主, 泥质胶结, 胶结疏松, 生产过程中, 尤其稠油油藏在开采过程中, 油井出砂严重。

(6) 资料录取不足: 海上勘探的成本及环境决定了各油气构造预探井、评价井少, 目前海上勘探井数只有 $1 \sim 5$ 口/ km^2 , 同时探井测试资料少、测试时间短, 为准确评价油气藏带来一定

难度。

(7)海上油气田开发投资规模大:与陆地相比,海上钻井、地面工程建设等投资规模大,投资集中、风险高。

下面重点介绍 NB35-2 油田、PL19-3 油田、SZ36-1 油田三个典型疏松砂岩油田的储层特性。

NB35-2 油田位于渤海中部海域,西北距河北省京塘港约 20km,西南距塘沽约 110km。油田由南区和北区组成,两区相距约 4.56km。该油田钻井揭示的地层从上至下为:第四系,新近系明化镇组、馆陶组,古近系东营组和古生界基底。地层由四周向基底高部位披覆,古近系地层厚度变化大。整个油田分为南北两个区块,北区储层为明化镇组和馆陶组顶部,明化镇组下段为主力油层段,南区储层为明化镇组下段。该油田具有原油稠、凝点高、油层疏松、高孔隙度、高渗透率、非均质性较强、埋藏浅、井斜大的特征。储集空间以原生扩大粒间孔为主,颗粒间为点状接触,孔隙式胶结,连通性较好。黏土矿物含量高(分析样品的黏土含量基本大于 10%),黏土矿物中又以蒙皂石、高岭石、伊利石和伊蒙混层为主,并有少量的绿泥石。存在各种类型潜在敏感性因素:应力敏感、水敏、盐敏、中等酸敏以及弱碱敏。NB35-2 油田所测得的平均声波时差为 105~130 μ s/ft,远大于出砂临界值 95 μ s/ft,所取的岩心极为疏松,成散砂状,探井 NB35-2-1 井、NB35-2-2 井、NB35-2-6 井、NB35-2-7 井 DST 和试油过程中,均表明地层有严重出砂现象。

SZ36-1 油田位于渤海辽东湾南部海域,从该油田的地质构造可以看出,SZ36-1 油田位于辽东湾下辽河拗陷、辽西低凸起中段,构造形态为北东走向的断裂背斜,西侧以辽西 1 号断层为界与辽西凹陷相邻,东侧以斜坡形式逐渐向辽中凹陷过渡。

SZ36-1 油田的地层是在下古生界石灰岩构成的潜山凸起上发育的一套碎屑岩沉积,地层层序从上到下依次为平原组、明化镇组、馆陶组、东营组和沙河街组。沙河街组地层在油田的东南部,其他大部分地区缺失。储层为古近系东营组下段,埋深 1300~1600m,为湖相三角洲沉积。纵向上划分为四个油组。I 油组、II 油组为主力油层,可细分为 14 个小层。在 I 油组之上的零油组为薄气层,在 II 油组之下的 III 油组是受潜山凸起控制且分布有限的油层。

SZ36-1 油田原油具有密度大、黏度高、胶质沥青质含量高、含硫量低、含蜡量低、凝点低等特点,属重质稠油。该油田储层发育,物性较好,孔隙度为 28%~35%,平均 31%;渗透率为 100~10000mD,平均 2000mD。油层分布相对稳定,但小层横向非均质性较严重。

PL19-3 油田构造位于渤海湾盆地东部渤南凸起上,北邻渤中、渤东凹陷,南西和南东为黄河口及庙西凹陷,为四个生油凹陷所环绕,处于油气聚积非常有利的位置。1999 年 5 月,PL19-3-1 井在该构造的馆陶组及明化镇组钻遇厚层油层,从而发现 PL19-3 油田。目前已钻 6 口评价井(PL19-3-2 井、PL19-3-4 井、PL19-3-5 井、PL19-3-6 井、PL19-3-7 井和 PL19-3-8 井)和两口侧钻取心井(PL19-3-6ST 井和 PL19-3-8ST 井),证实了 PL19-3 油田。

PL19-3 油田是一个储量规模大、开发难度高的复杂大油田。其储层具有以下特点:

油层段 900~1400m,厚度约为 500m,砂泥岩交互,油层净厚度约为 145m,单油层较薄,储层段多达 50 个小层。明化镇组下段储层主要为细一中砂岩。单砂层厚度 1~25m,砂岩胶结疏松。馆陶组储层主要为成岩较差的中—极粗砂岩,单砂层厚度从小于 1m 到大于 7m。

从流体性质来看,试生产区明化镇组(I0—4)原油黏度高(50~100mPa·s),属稠油范畴;而馆陶组(I5—11)原油黏度小于 50mPa·s 属中高黏原油,二者差异明显。

明化镇组油层以细粉砂岩为主,颗粒集中在小于 200 μ m 的区间内,胶结程度差,易出砂;

馆陶组(L5—11)属中—细砂岩,或含砾中—细砂岩,分选性差,成岩作用强于明化镇组(L0—4),出砂可能性相对较低。

一、储层强度特性分析

储层出砂是由于炮孔壁岩石所受应力超过其本身的强度使地层产生剪切破坏或拉伸破坏而造成的,是否出砂与储层本身的强度密切相关。确定地层强度直观而又最为可靠的方法是对现场岩心进行模拟室内温压条件下的三轴强度实验。通过室内强度实验,可以测出不同围压下的三轴强度,可得出储层的强度参数、弹性模量及泊松比。

由于岩心数量有限,本项目收集了岩石力学实验室完成的取自渤海湾地区 BZ25 - 1 油田、BZ26 - 2 油田和 SZ36 - 1 油田明化镇组、沙河街组、馆陶组及东营组等岩心强度实验数据进行了统计分析,实验数据如表 1 - 1 所示。

表 1 - 1 BZ25 - 1 油田、SZ36 - 1 油田和 BZ26 - 2 油田地层力学特性实验结果

序号	油田	井号	井深(m)	地层	密度 (g/cm ³)	围压 (MPa)	破坏强度 (MPa)	弹性模量 (10 ³ MPa)	泊松比
1	BZ25 - 1	BZ25 - 1 - 6	1728.1	明化 镇组	2.113	0	2.593	1.282	—
2			1731.1		2.112	0	3.003	1.573	—
3			1731.56		2.083	0	2.656	1.486	—
4		BZ25 - 1 - 7	1753.8		2.159	0	1.866	1.412	—
5			1754.2		2.218	0	2.929	1.536	—
6			1766		2.2	0	1.624	1.215	—
7			1767.34		2.203	0	2.866	1.498	—
8		BZ25 - 1 - 5	3542.51	沙河 街组	2.408	0	59.27	—	—
9			3319.73		2.362	0	17.62	—	—
10			3323.83		2.409	0	20.62	—	—
11			3322.06		2.548	0	26.25	—	—
12			3657.89		2.48	0	35.34	—	—
13			3660.64		2.407	0	29.22	—	—
14			3657.73		2.483	0	30.97	—	—
15			3325.3		2.409	0	38.07	—	—
16			3322.38		2.527	0	42.85	—	—
17			3324.41		2.418	0	53.84	—	—
18			3659.08		2.467	0	30.9	—	—
19	SZ36 - 1	SZ36 - 1 - 5	1511.8	东营组	2.2	0	2.1	1.302	0.1935
20			1511.82		2.195	5	14.56	—	—
21			1512.4		2.17	10	24.97	—	—
22			1512.42		2.15	0	2.5	1.358	0.1931
23			1512.9		2.18	15	13.24	—	—
24			1512.93		2.175	20	14.68	—	—
25			1513.1		2.18	0	2.2	1.278	0.1956
26			1513.15		2.09	5	15.3	—	—
27			1531.3		2.34	8	22.5	—	—
28			1531.32		2.31	0	2.91	1.597	0.1846

续表

序号	油田	井号	井深(m)	地层	密度 (g/cm ³)	围压 (MPa)	破坏强度 (MPa)	弹性模量 (10 ³ MPa)	泊松比
29	SZ36-1	SZ36-1-5	1558.3	东营组	2.29	7	13.5	—	—
30			1558.35		2.23	13	14.51	—	—
31			1562.5		2.26	18	14.33	—	—
32			1562.7		2.21	0	1.89	1.449	0.1888
33			1562.73		2.19	10	8.15	—	—
34			1563		2.28	20	9.63	—	—
35			1563.7		2.25	25	14.44	—	—
36			1563.74		2.24	0	3.36	1.572	0.184
37			1565.7		2.12	6	21.65	—	—
38			1565.74		2.17	16	14.19	—	—
39	BZ26-2	BZ26-2-3D	1914.34	馆陶组	1.93781	0	4.877	1.228	0.456
40			1914.46		1.85334	20	9.25	—	—
41			1915.12		1.79643	0	3.2	—	—
42			1915.3		1.81359	15	31.34	—	—
43			1915.69		1.8379	0	3.46	—	—
44			1915.85		1.88015	25	49.25	—	—
45			1916.1		2.08246	0	8.8	—	—
46			1916.81		2.17004	10	35.82	—	—
47			1917.75		1.8689	20	32.24	—	—
48			1918		1.97076	0	4.51	—	—
49			1918.32		2.14166	15	36.57	—	—
50			1919.06		1.92647	0	5.28	—	—
51			1919.06		1.90755	10	12.99	—	—
52			1919.34		1.94664	0	4.29	—	—
53			1919.61		1.90433	0	5.01	—	—
54			1919.61		1.92077	20	32.24	—	—
55			1919.86		1.97352	0	5.28	—	—
56			1920.23		1.98201	0	5.28	—	—
57		BZ26-1-1	2070.12		2.05776	0	7.087	2.335	0.886
58			2070.25		2.173	20	37.31	—	—
59			2070.91		1.96928	0	7.614	1.631	0.702
60			2071.31		2.12978	0	7.824	2.279	0.788
61			2071.38		2.03718	0	9.718	2.455	0.681
62			2071.67		1.76556	15	18.36	—	—
63			2071.81		1.96265	25	51.94	—	—
64			2071.87		1.93975	0	6.666	2.005	0.739
65			2072.47		1.94664	0	6.456	1.618	0.601
66			2072.52		2.03718	0	5.93	1.444	0.657
67			2072.52		1.88548	10	16.57	—	—
68			2072.88		1.8844	0	5.193	1.359	1.571
69			2072.88		1.94664	20	33.58	—	—
70			2072.94		1.90986	0	7.719	1.685	0.457
71			2073.16		2.1022	0	1.14	2.601	0.473
72			2073.16		2.03718	30	68.66	—	—
73			2073.25		2.12387	0	9.718	2.171	0.346
74			2073.32		1.6637	0	0.8	1.097	0.458

渤海油田岩心的典型应力—应变曲线(图 1-1)表明:储层破坏为典型的塑性破坏,没有明显的塑性屈服破坏点,岩石屈服后仍能承受一定的载荷。对于这类岩石,其产生拉伸破坏主要是由于其应变量大大使颗粒之间的连接逐渐减弱,导致最终岩石颗粒产生分离而破坏。破坏强度一般为 1~6MPa。

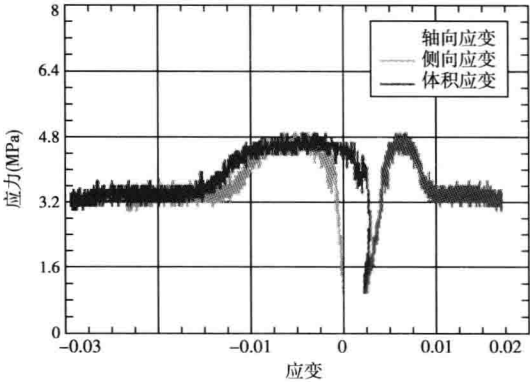


图 1-1 渤海油田岩心应力—应变曲线

根据岩心实验的单轴抗压强度统计(图 1-2)可以得出以下结论:

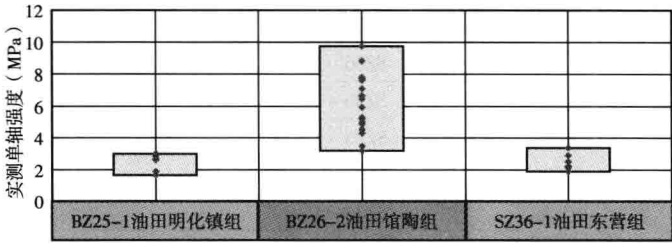


图 1-2 渤海油田实测单轴强度统计图

- (1)渤海油田浅层地层的强度均较低,一般在 10MPa 以下,出砂可能性均较高。
- (2)具体分析,明化镇组埋深较浅,强度最低,一般为 1.8~3MPa,为典型的弱胶结疏松砂岩。SZ36-1 油田的东营组相对埋藏深度较浅,单轴抗压强度也偏低,主要为 2~3.5MPa。
- (3)沙河街组埋藏较深,单轴强度基本为 3.5~10MPa。

二、储层粒度特性分析

渤海湾地区已开发的 20 多个油田多属疏松砂岩油藏,储层埋藏浅,胶结疏松,强度低,开采过程中易出砂,基本上都要进行防砂开采。储层粒度的不同特性是进行防砂完井参数和精度设计的重要依据。目前常用的粒度测试方法是筛析法和激光粒度法。而现场能取得的储层砂样有限,一般只有几口探井和特殊用途井进行取心,在一定程度上具有代表性。由于沉积环境的差异及地层的非均质性和各向异性,所取砂样并不能完全代表周边井的粒度分布情况。利用其进行防砂方式和防砂参数的设计精度会明显降低,这也是有不少井利用邻井或探井的粒度数据进行防砂设计失效或防得过死导致产量低的原因。摸清储层的粒度分布规律是进行防砂方式选择和参数精度选择的基础。

根据 NB35-2 油田、SZ36-1 油田和 PL19-3 油田三个油田的储层划分(表 1-2),对取心井进行过粒度测试的层段的粒度数据进行统计分析。NB35-2 油田 4 口取样井,95 个样品进行粒度测试;SZ36-1 油田 19 口取样井,428 个样品进行粒度测试;PL19-3 油田 14 口取样

井,273 个样品进行了粒度测试;三个油田共收集到 796 个粒度测试结果。具体粒度测试统计情况见表 1-3。

表 1-2 三个油田储层划分

油 田	主力开发储层	
NB35-2	明化镇组	馆陶组
SZ36-1	东营组下段(I u, I d, II 油组)	
PL19-3	明化镇组下段	馆陶组

表 1-3 粒度测试情况统计

油 田	取 样 井	取样数(个)
NB35-2	NB35-2-A11	16
	NB35-2-4	30
	NB35-2-6	37
	NB35-2-1	12
小计	4 口井	95
SZ36-1	SZ36-1-11	45
	SZ36-1-12	9
	SZ36-1-13	14
	SZ36-1-15	14
	SZ36-1-16	39
	SZ36-1-18	9
	SZ36-1-19d	8
	SZ36-1-22	10
	SZ36-1-23	29
	SZ36-1-2d	27
	SZ36-1-3	6
	SZ36-1-4	22
	SZ36-1-5	6
	SZ36-1-6	77
	SZ36-1-7	57
	SZ36-1-B19	34
	SZ36-1-B7	2
	SZ36-1-C9	3
	SZ36-1-G19	17
小计	19 口井	428
PL19-3	PL19-3-4	19
	PL19-3-6st	24
	PL19-3-8st	42
	PL19-3-A15	2
	PL19-3-A17	2
	PL19-3-A20	4
	PL19-3-A24ST04	3
	PL19-3-B32	32

续表

油 田	取 样 井	取样数(个)
PL19 - 3	PL19 - 3 - C25	20
	PL19 - 3 - C45	31
	PL19 - 3 - D11	13
	PL19 - 3 - D31	37
	PL19 - 3 - D32	40
	PL19 - 3 - D41	4
小计	14 口井	273
合计	37 口井	796

由粒度测试结果,对 NB35 - 2 油田和 SZ36 - 1 油田主力储层的粒度测试结果进行对比分析,粒度分布曲线如图 1 - 3 至图 1 - 7 所示。

(1) NB35 - 2 油田主力储层粒度分布。

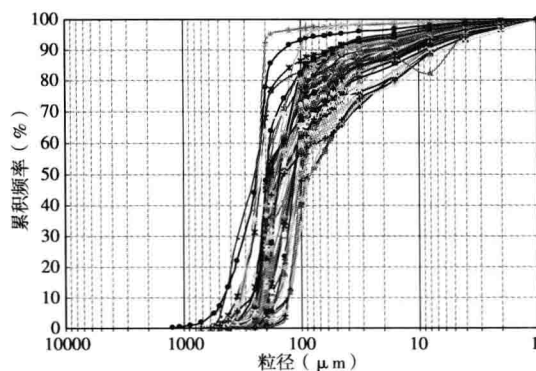


图 1 - 3 NB35 - 2 油田明化镇组粒度分布曲线($d_{50} = 100 \sim 200 \mu\text{m}$)

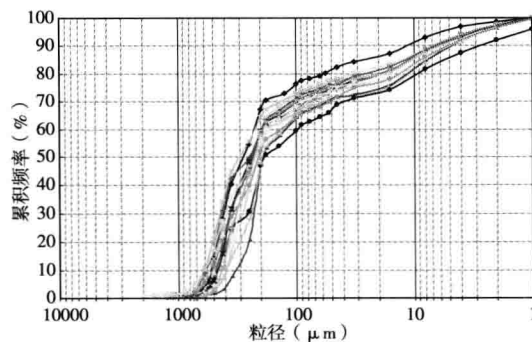


图 1 - 4 NB35 - 2 油田馆陶组粒度分布曲线($d_{50} = 200 \sim 300 \mu\text{m}$)

(2) SZ36 - 1 油田主力储层粒度分布。

(3) 渤海湾地区油田储层粒度分布特性小结。

根据实测数据,可以得出渤海湾 NB35 - 2 油田、PL19 - 3 油田、SZ36 - 1 油田不同储层的粒度变化规律。

① NB35 - 2 油田、PL19 - 3 油田:

明化镇组 d_{50} 为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$; 馆陶组 d_{50} 为 $200 \sim 300 \mu\text{m}$ 。

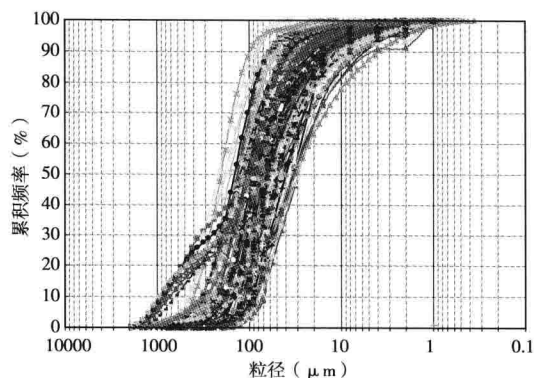


图 1-5 SZ36-1 油田东营组下段 I u 油组粒度分布曲线($d_{50} = 50 \sim 200\mu\text{m}$)

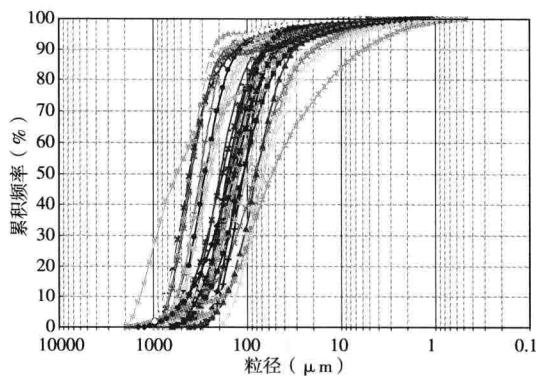


图 1-6 SZ36-1 油田东营组下段 I d 油组粒度分布曲线($d_{50} = 50 \sim 400\mu\text{m}$)

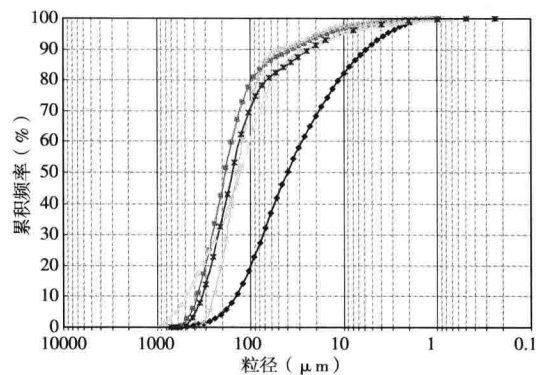


图 1-7 SZ36-1 油田东营组下段 II 油组粒度分布曲线($d_{50} = 150 \sim 200\mu\text{m}$)

② SZ36-1 油田东营组下段纵向上分 I u, I d, II, III 等油组,在横向上又分为 A, B, C, D, E, F, G, H 等井区,因此,分别对井区进行统计,结果见表 1-4。

表 1-4 SZ36-1 油田粒度变化规律

井区	粒度中值(μm)		
	I u 油组	I d 油组	II 油组
A	50	100	50
B	50	50 ~ 250	—
C	50 ~ 150	80 ~ 150	100 ~ 150

续表

井区	粒度中值范围		
	I u 油组	I d 油组	II 油组
D	50 ~ 100	80 ~ 150	120 ~ 150
E	50 ~ 200	50 ~ 150	50 ~ 100
F	80 ~ 200	50 ~ 200	—
G	80 ~ 150	100 ~ 250	80 ~ 150
H	100 ~ 250	100 ~ 250	100 ~ 250

三、储层泥质含量统计

泥质含量及黏土矿物组分的含量是防砂方式选择的一个重要参考依据。泥质含量的高低及黏土矿物组分的吸水性、膨胀性等对优质筛管完井防砂是否堵塞影响很大,如果黏土含量很高,筛管非常容易被堵塞。筛管抗堵性能评价实验表明,当黏土含量小于5%时,优质筛管不易被堵塞;高于10%时,优质筛管容易堵塞,不适合单独使用。因此在选择防砂方式时要考虑泥质含量对防砂管的堵塞影响因素。泥质含量及黏土矿物组分测定一般采用矿物X射线衍射测试仪。

1. NB35-2 油田泥质含量统计

NB35-2-6 井和 NB35-2-5 井泥质含量分布图见图 1-8。由 NB35-2-6 井泥质含量平均为 15%,NB35-2-5 井泥质含量平均 11%,说明 NB35-2 油田主力储层明化镇组的泥质含量比较高,容易堵塞筛管,在采用优质筛管直接完井时应特别慎重。

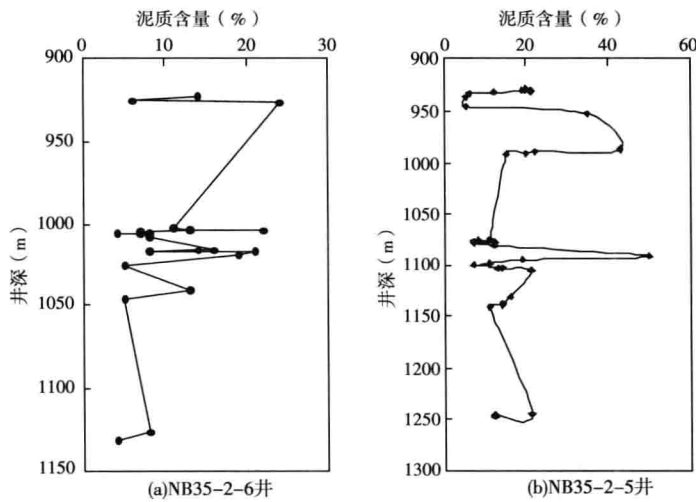


图 1-8 NB35-2-6 井和 NB35-2-5 井的泥质含量

2. SZ36-1 油田泥质含量统计

对 SZ36-1 油田 10 口探井储层岩心采用矿物 X 射线衍射测试仪,测试了 32 个样品的泥质含量及黏土矿物组分。测试结果见表 1-5。

表 1-5 SZ36-1 油田全岩分析测试结果

井号	井段(m)	矿物含量(%)							黏土矿物 总量(%)
		石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	石膏	
SZ36-1-19	1420	45.1	5.7	16.9	4.6	—	—	—	27.7
SZ36-1-2d	1529.5	38.5	29	9	0.9	—	—	—	22.6

续表

井 号	井段(m)	矿物含量(%)							黏土矿物 总量(%)
		石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	石膏	
SZ36-1-18	1401	55.1	9.5	—	—	6.2	—	—	29.2
SZ36-1-13	1453	54.2	6	8	11.4	—	—	—	20.4
SZ36-1-22	1524	56.7	16.8	—	—	6.7	—	—	19.8
SZ36-1-7	1512	59	5.8	8.2	0.2	—	—	—	26.8
SZ36-1-15	1591	63.3	6.2	8.8	0.2	—	—	—	21.5
SZ36-1-23	1384	55	10.7	9.3	0.4	—	—	—	24.6
SZ36-1-5	1404	54.9	6.1	20.4	—	—	—	—	18.6
SZ36-4-12	1409.5	47.5	5.2	14.2	9.6	—	4.5	0.4	18.6

由实测数据可知,该油田的黏土矿物含量较高,都超过了18%,对于选用优质筛管直接防砂的情况,应特别注意泥质堵塞防砂管的情况发生。

表 1-6 SZ36-1 油田黏土矿物组分测试结果

分析号	井号	井段(m)	黏土矿物相对含量(%)						混层比(%)	
			蒙皂石	伊蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石	绿蒙混层	伊蒙混层	绿蒙混层
1	SZ36-1-B19	1420	81	—	7	9	3	—	—	—
2	SZ36-1-B19	1440	59	—	11	30	—	—	—	—
3	SZ36-1-B19	1505	88	—	2	10	—	—	—	—
4	SZ36-1-2d	1529.5	88	—	3	9	—	—	—	—
5	SZ36-1-18	1387	—	6	2	92	—	—	50	—
6	SZ36-1-18	1401	—	18	12	70	—	—	40	—
7	SZ36-1-13	1453	55	—	13	32	—	—	—	—
8	SZ36-1-13	1487	40	—	6	54	—	—	—	—
9	SZ36-1-22	1422	—	1	3	96	—	—	40	—
10	SZ36-1-22	1524	—	—	6	94	—	—	—	—
11	SZ36-1-7	1512	70	—	8	22	—	—	—	—
12	SZ36-1-7	1547	63	—	9	28	—	—	—	—
13	SZ36-1-15	1547	87	—	4	9	—	—	—	—
14	SZ36-1-15	1591	70	—	5	25	—	—	—	—
15	SZ36-1-23	1372	70	—	10	20	—	—	—	—
16	SZ36-1-23	1384	93	—	2	5	—	—	—	—
17	SZ36-1-23	1426	—	73	4	23	—	—	70	—
18	SZ36-1-23	1540	—	—	5	95	—	—	—	—
19	SZ36-1-5	1404	62	—	7	31	—	—	—	—
20	SZ36-1-5	1525	49	—	10	41	—	—	—	—
21	SZ36-1-12	1409.5	71	—	11	18	—	—	—	—
22	SZ36-1-12	1553.5	—	50	8	42	—	—	60	—

从SZ36-1油田黏土矿物成分测定和统计(表1-6、图1-9)可知,该油田黏土组分以蒙皂石与高岭石为主。由于蒙皂石及高岭石吸水膨胀性强,在防砂时容易堵塞优质筛管,在选用防砂管时应特别注意。

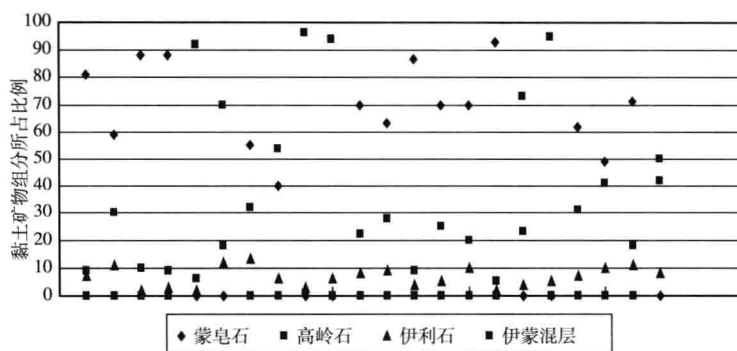


图 1-9 黏土矿物组分所占比例

对比 NB35-2 油田和 SZ36-1 油田的泥质含量,两个油田的泥质含量均高于 10%,不易采用筛管直接防砂,同时 SZ36-1 油田的主力储层黏土矿物成分属于易膨胀的蒙皂石和高岭石,更容易引起筛管堵塞。

第二节 渤海稠油油田开发模式和防砂技术的发展历程

一、渤海稠油油田开发模式的发展历程

目前渤海海域稠油开发走过了 40 个春秋,通过发展海上稠油油田开发技术,克服了种种困难,使稠油油田得以有效开发。根据渤海海域稠油开发特点,其开发历程可以划分为自主创业——试验性开发(1967—1984 年)、对外合作——正规开发(1985—1992 年)、自营开发——产量快速增长(1993—2000 年)、自营合作并举——产量高速增长(2001—2005 年)、自主创新——综合调整助推产量高速增长(2005—2010 年)五个阶段。但以 SZ36-1 油田为代表的海上大型稠油油田开发调整走过了更加艰难曲折的历程。

1. 开辟试验区探索海上稠油水驱开发模式(1989—2000 年)

1987 年,渤海海域发现了石油地质储量近 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$,当时海上唯一的大型稠油油田——SZ36-1 油田,由于原油性质差(地面原油相对密度为 0.93 ~ 0.97;地层原油黏度一般为 $70 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,靠近边水区域的地层原油黏度高达 $400 \text{ mPa} \cdot \text{s}$),储层胶结疏松需要防砂,业界当时普遍怀疑这样的油田在海上进行开发是否有经济效益。渤海公司成立联合项目队开展油田开发早期评价,同时使用世界银行贷款和美国政府 TDP 赠款,委托美国 SSI 公司和 GAI 公司进行咨询评价,之后又组织国内陆上油田知名专家进行了多次论证。多方研究结果认为油田原油黏度大、溶解油气比低、天然气能量少、油井生产出砂等不利因素增加了开发的难度。当时,此类稠油油藏的开发在中国海上尚属首次。根据陆上经验,如果用常规方式开采平均单井日产能仅有 $20 \sim 30 \text{ m}^3$,在海上开发投资高、技术要求高的条件下则毫无经济效益。由于产量风险大,油田整体开发没有把握,为探索渤海海上稠油开发之路,有效开发 SZ36-1 油田,规避开发风险,进行了多层次的地质油藏研究,最终决定在构造主体部位开辟生产试验区。通过试验区开发,了解油层连续性和分布形态、开发层系的划分与组合、油井合理产能、井网对油层的适应性、油井先期防砂和机械采油方式等多个方面的信息,为后期开发提供经验基础和理论依据。

经过反复论证,将生产试验区分成 A、B 两个区,A 区由 2 个钻井平台组成,钻井 32 口;B

区1个钻井平台,钻井16口,采用300~350m井距的反九点井网、多层合采开发,井控储量达到 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$,优先动用储量和产能风险较小的优质储量区,单井日产量达到 $70 \sim 80 \text{ m}^3$,迅速建成 $100 \times 10^4 \text{ t}$ 产能规模,进行井网层系、注采工艺、防砂技术等试验,为油田的整体开发,由海到陆的开发模式积累经验,做好技术储备。

2. 整体开发形成海上稠油水驱开发模式(2001—2005年)

1997年11月,中国海洋石油总公司组织编制了SZ36-1油田整体开发方案。遵循整体高速开发、紧凑投产的原则,实现中国海洋石油总公司原油产量长远战略目标的要求;采用试验区开发经验和经济有效开采工艺技术,最大限度地动用储量;充分发挥已开发区的生产设施能力;采取区间接替的稳产方式,适当延长稳产期;采用先进工艺技术,以提高常规注水采收率为基础,寻求可行的提高采收率(EOR)方法,提高油田开发整体经济效益。新区仍采用常规注水和人工举升开发方式;参照试验区开发经验,仍采用反九点井网开发新区井距为350m,在局部区域如断层附近或边部地区井距放大到400~450m,采用一套层系、合采分注开发,整个油田设计产能达到 $500 \times 10^4 \text{ t}$ 的产量安排,水驱采收率可达21%。2000年11月至2001年11月,SZ36-1油田Ⅱ期开发井陆续投产。

3. 整体加密调整完善海上稠油水驱开发模式(2006—2011年)

2007年底,SZ36-1油田Ⅰ期开发经历了13年,含水率达到65%,采出程度仅14.4%,标定水驱采收率24.1%。针对暴露出的层间矛盾加剧、注水不平衡等开发问题以及相关配套技术难题,中国海洋石油总公司组织开展了SZ36-1油田Ⅰ期整体加密调整相关的系列技术研究,主要包括大井距多层合采稠油油藏剩余油定量描述技术、稠油油藏不同井型生产能力评价技术、整体加密调整方案优化技术、密集丛式井网定向井防碰技术、复杂压力体系油藏钻完井全过程储层保护技术、轻型可搬迁模块钻机建造及滑移共享技术、平台外挂井槽技术等。经过多方论证,最终采用油井排井间加密、水井排油井转注的平行构造方向井网形式,使用定向井和水平井两种井型,设计调整井52口,增加可采储量 $1224 \times 10^4 \text{ m}^3$,提高水驱采收率10.4%。从整体加密调整实施效果来看,采油速度翻番,标志着首次海上油田丛式井网整体加密调整成功实施,逐步探索出了一条海上油田水驱开发调整的新路子,由此拉开了海上油田丛式井网整体加密调整的序幕。

二、渤海油田防砂技术发展历程

自20世纪80年代以来,随着渤海稠油油田开发模式的转变,为了满足不同油层开采的需要,防砂工艺技术也在不断地发展和完善,已经形成了一系列适应不同地质条件和井况的防砂工艺技术。回顾海洋石油防砂技术的发展历程,大致可以分为以下几个阶段。

(1) 第一阶段。

1983年以前,渤海油田早期的完井方式主要为套管内射孔完井,如已废弃的Hai-1等4座生产平台。防砂方式主要包括近井带化学固化、预充填筛管防砂、自制绕丝筛管防砂、割缝管防砂等。此类防砂方式简单易行,施工成本较低。但其缺点为防砂有效期短,后期产能损失大。

(2) 第二阶段。

1983—1998年,埕北油田、SZ36-1油田Ⅰ期、歧口17-3油田、歧口18-1油田等引入了STACK PACK(逐层充填)技术。采用循环水和胶液充填方式,在充填之前进行酸预处理工艺。埕北油田采用陶粒作为支撑剂,随后都采用了石英砂。逐层充填技术可大幅度提高油井的防