

多枝导流适度出砂技术 研究与应用

姜 伟 周建良 著



科学出版社

国家“十二五”科技重大专项

多枝导流适度出砂技术 研究与应用

姜 伟 周建良 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了多枝导流适度出砂技术体系的基础理论及应用情况,以多枝导流适度出砂技术的增产机理及油藏工程为基础,围绕产能评价、井壁稳定性、携砂采油理论、防砂优选研究以及配套钻完井技术、采油工艺等进行了详细阐述,并举例介绍了集成技术的现场应用情况及效果。本书的出版对国内近海疏松砂岩油藏的高效开发具有重要的现实指导意义,必将推动该项技术的不断完善,推进其在现场的有效应用。

本书可供石油院校、科研院所等单位科研人员参考,亦可作为油气田开发设计人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

多枝导流适度出砂技术研究与应用/姜伟,周建良著. —北京: 科学出版社, 2015.11

国家“十二五”科技重大专项

ISBN 978-7-03-046229-9

I. ①多… II. ①姜… ②周… III. ①砂岩油气藏-出砂-研究
IV. ①TE343

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 264637 号

责任编辑: 周 丹 沈 旭 / 责任校对: 张怡君
责任印制: 赵 博 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张: 17

字数: 403 000

定价: 108.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 言

随着国内能源消耗的逐渐增加,陆上资源已远远不能满足需求。我国近海有丰富的油气储量,资源开发转向海洋已成为一种趋势,海上石油开发也将成为今后能源的重要来源,因此,国内海洋油气开发的力度在快速增大。

如何高效开发海上油气田是科研工作者亟须解决的问题。以渤海海域为代表的国内海洋油田具有埋藏浅、胶结程度低、原油黏度高等特点,开发过程中几乎都遇到了生产出砂的问题,如何高效开发成为研究的关键。中国海洋石油总公司依托国家科技重大专项课题“多枝导流适度出砂技术”,针对我国的近海疏松砂岩油藏的特点,开展了多枝导流适度出砂技术的研究工作,研究成果包括多枝导流适度出砂的油藏工程及产能评价技术、配套钻完井技术、携砂采油理论及技术等,最终形成了一套适用于国内近海疏松砂岩油藏开发的多枝导流适度出砂生产技术体系,并在现场得到成功的应用,有效地提高油井产能,降低开发成本。

《多枝导流适度出砂技术研究与应用》系统介绍了该项技术体系的理论及应用情况,以多枝导流适度出砂技术的增产机理及油藏工程为基础,围绕产能评价、井壁稳定性、携砂采油理论、防砂优选研究以及配套的钻完井技术、采油工艺等进行了详细阐述,并举例介绍了集成技术的现场应用情况及效果。本书展示了中海油在海上油气田开发过程中的技术创新理念及创新能力。

本书是作者在国家科技重大专项“多枝导流适度出砂技术”研究过程中的重要结晶,本书的出版对国内近海疏松砂岩油藏的高效开发具有重要的现实指导意义,必将推动该项技术的不断完善,促进现场的有效应用。

本书是一本理论性与实用性并重的油气田开发类书籍,可作为石油院校、科研院所等单位的参考用书,亦可作为现场工作人员在进行相关类型的油田开发方案设计、开采措施优化研究的参考资料。

周宇为

2015.11.1.

前 言

多枝导流适度出砂技术是将多分枝井技术与适度出砂技术相结合的一种大幅提高油井产量的新技术。作为多分枝井的一种特殊井型,多枝导流井在国内外油田尤其是海上稠油油田应用越来越广泛,成为油气田开发、提高采收率的先进技术。与直井和水平井相比,多枝导流井可以更多地暴露储层,扩大与储层的接触面积,大幅度提高单井控制储量,减少开发井数,降低开发成本,提高油气井的效益,实现海上油田少井高产的目标。适度出砂生产是将防砂技术与出砂冷采结合并用的一种高效的油井生产方式,其通过对油井产能或产量进行优化评价,制定最优的出砂或防砂生产方案,即进行有限度、有选择的防砂,使油井在可能的最大生产速度下开采,而又不会对储层造成损害。

本书结合文献调研、数值模拟、室内实验研究及现场应用等方面,系统介绍了多枝导流适度出砂技术的发展、增产机理、产能评价、关键技术及现场应用等。利用出砂机理增产微观实验,深入研究了该技术的增产机理;通过建立出砂带扩展预测模型及疏松砂岩油藏流固耦合模型,对多枝导流适度出砂井的产能评价进行了深入研究;通过有限元模拟及室内实验评价,分别分析了分枝结构对井眼系统稳定性及临界生产压差的影响、多枝导流适度出砂开采及地层水侵对井壁稳定性的影响等,并建立了一套评价多枝导流适度出砂井分枝裸眼井壁稳定性的技术方法;本书还详细介绍了适度出砂管理的防砂方式、防砂方式选择依据及优选方法,根据防砂效果及抗堵能力评价实验、砾石充填防砂模拟及挡砂精度试验、不同方式防砂模拟试验评价及研究,建立了防砂方式优选图版,形成了一套防砂参数设计方法,并介绍了现场应用情况;本书还深入研究了多枝导流适度出砂井的钻完井关键技术、采油工艺及机采设备等内容。结合油田开发的应用实例,书中详细介绍了多枝导流适度出砂的部分关键技术在油田的现场试验及效果,以及技术集成在渤海部分油田的应用情况。

全书共分为九章:第一章介绍了多枝导流适度出砂技术的发展及认识;第二章深入研究了多枝导流适度出砂技术的增产机理;第三章介绍了多枝导流适度出砂井产能评价技术;第四章研究了多枝导流适度出砂井井壁的稳定性;第五章介绍了多枝导流适度出砂井的井筒携砂采油理论;第六章介绍了多枝导流适度出砂井的防砂实验;第七章介绍了多枝导流适度出砂井的钻完井关键技术;第八章研究了多枝导流适度出砂井的采油工艺及机采设备;第九章介绍了多枝导流技术的集成应用及技术展望。

本书是作者的国家科技重大专项课题“多枝导流适度出砂技术”研究成果的结晶,成书期间得到中国海洋石油总公司、中海石油(中国)有限公司和中海油研究总院及其他相关科研院所等单位的支持和配合,在此对“多枝导流适度出砂技术”重大专项项目组及所有给予支持帮助的单位 and 同事一并表示衷心的感谢!

多枝导流适度出砂技术是一个尚在不断发展和完善中的技术体系,涉及的知识面广,技术体系复杂。本书难免有不妥和错误之处,恳请广大读者不吝指正!

目 录

第一章 概述	1
第一节 多枝导流适度出砂技术的发展历程	1
第二节 多枝导流适度出砂技术初识	3
第二章 多枝导流适度出砂技术增产机理研究	12
第一节 海上典型疏松砂岩稠油油藏的储层地质特征	12
第二节 多枝导流增产机理研究	16
第三节 适度出砂增产机理研究	19
第三章 多枝导流适度出砂井产能评价技术研究	39
第一节 地层出砂机理及影响因素	39
第二节 出砂带扩展预测	44
第三节 疏松砂岩油藏流固耦合渗流模型	49
第四节 多枝导流适度出砂井产能评价模型	66
第四章 多枝导流适度出砂井井壁稳定性研究	79
第一节 分枝结构对分枝井眼系统稳定性及临界生产压差的影响	79
第二节 多枝导流井适度出砂开采对井壁稳定性的影响研究	92
第三节 地层水侵对主井眼及分枝系统井壁稳定性的影响研究	99
第四节 疏松砂岩油藏多枝导流适度出砂分枝裸眼井稳定性评价方法	101
第五章 复杂结构适度出砂井井筒携砂采油理论研究	104
第一节 井筒沙-液混合流动模型	104
第二节 复杂结构井全井段携砂能力预测模型	114
第三节 复杂结构井压降预测模型	118
第四节 适度出砂油井井筒携砂计算	128
第六章 多枝导流适度出砂井防砂实验研究	134
第一节 适度出砂管理的防砂方式	134
第二节 防砂方式选择依据及优选方法	135
第三节 防砂管防砂效果及抗堵能力评价实验	139
第四节 砾石充填防砂模拟与挡砂精度实验	143
第五节 不同方式防砂模拟实验及防砂图版建立	148
第六节 防砂参数设计方法	162
第七章 多枝导流适度出砂钻完井关键技术研究	173
第一节 多枝导流适度出砂井三维可视化钻井技术	173
第二节 多枝导流适度出砂钻完井液体系研究	181

第三节 多枝导流适度出砂井防砂完井工艺	193
第八章 多枝导流适度出砂井采油工艺及机采设备研究	196
第一节 多枝导流适度出砂机采设备研究	196
第二节 多枝导流适度出砂井出砂监测系统研究	204
第三节 泡沫洗井液冲砂技术	216
第四节 地面油砂分离装置研究	238
第九章 多枝导流适度出砂技术现场应用及展望	241
第一节 多枝导流适度出砂技术现场试验应用	241
第二节 多枝导流适度出砂集成技术展望	255
参考文献	261

第一章 概 述

第一节 多枝导流适度出砂技术的发展历程

一、技术的提出

随着国内能源消耗的逐渐增加,陆上资源已远远不能满足需求,我国近海有大量的油气储量,资源开发转向海洋已成为一种趋势,海上油气开发也将成为今后能源的重要来源,因此,国内海洋油气开发的力度在快速增大。

我国的近海油气田一般埋藏浅、成岩差,多属于疏松砂岩油藏;从目前发现和动用的储量看,地层流体多为稠油,在渤海已开发的油田中,疏松砂岩稠油油田占 80%左右。在海上稠油油田开发过程中,取得了很多成绩:① 采用砾石充填的防砂方法,解决了地层出砂的问题;② 采用优快钻井技术显著降低了海上钻完井作业费用。同时,也面临严重的挑战:① 砾石充填防砂井表皮系数大,油井的产量不高;② 常规钻完井技术无法解决油井产能问题;③ 稠油油田含水上升较快;④ 油田采出程度低。

目前,在近海油气田的开采过程中,面临的主要问题就是生产出砂。以渤海油区为代表的国内海洋稠油油气开发过程中几乎都遇到了生产出砂的问题,出砂严重会造成砂埋井眼、磨蚀管柱、地面砂处理困难以及磨蚀地面和井下设备等问题^[1,2]。目前的措施主要是采取完全防砂的完井手段,这会造成三方面的后果:首先就是由于生产压差受到限制,很难充分发挥油井的产能;其次就是采用防砂措施会造成附加表皮的增加,导致油井产能降低;最后就是一旦防砂措施失败,就有可能需要进行关井停产修整。

为了在防砂和出砂生产之间寻求最优的解决方案,针对我国的近海疏松砂岩油藏特点,在借鉴国内外开发经验的基础上,中国海洋石油总公司提出了多枝导流适度出砂提高油井产能的技术思路,以保证油井既能实现长期高产、稳产,又能达到防砂效果。

油井出砂及其程度与岩石自身强度、生产压差、流体速度等因素有关^[3-5]。岩石强度是储层固有的特性,无法通过工艺手段加以改变,但生产压差、流体速度可以通过增加泄流面积的方式来减小,从而减缓储层出砂的趋势或缓解出砂程度。“多枝导流适度出砂”技术包括两个层次,首先用机械钻井方法人为地在主井筒附近地层中制造出原油的快速流动通道,由若干个分枝井组成,形成原油在近井地带流动的“高速公路”主干线;其次,利用稠油较强的携砂能力,“适度出砂”允许部分细粉砂随稠油排出地层,从而在近井筒地带形成高渗带,进一步提高油流能力。由多枝导流形成的主干线和由适度出砂形成的高渗带共同构成了原油从地层流到井筒的畅通网络;多枝导流适度出砂技术可增加储层泄流面积,并通过储层适度出砂,降低生产压差,不但提高了单井产能,同时也减缓了底水锥进速度,并最终达到提高油田采收率的目的。

在海上稠油油田的开发过程中,既需要提高油田整体的采收率,又需要尽量降低桶油成本,对可以解决油井产能的钻采技术需求迫切;而多枝导流技术和适度出砂技术综合应用可

解决制约渤海湾疏松砂岩稠油油藏开发的单井产能低的难题,同时通过控制压差生产,减缓水锥移动速度,可显著提高海上油田开发效益和采收率。尽管目前多枝导流适度出砂技术在海上稠油油田的开发中进行了初步的应用,但多枝导流油藏渗流机理、产能评价和井型优化设计技术仍需深入研究,多枝导流适度出砂钻采关键技术仍然为国外公司所掌握,国外公司实行技术封锁,服务价格垄断,大大提高了海上稠油油田开发成本。

因此,多枝导流适度出砂技术的推广应用是一种必然的发展趋势,在这种发展趋势的推动下,对与其相关的各种理论和应用进行研究非常必要。

二、技术发展历程

多枝导流适度出砂技术是随着适度出砂技术的发展而逐渐形成的,这里主要针对适度出砂技术的发展历程进行简要介绍。

(一) 国外研究情况

适度出砂生产^[6-15],国外称之为出砂管理(sand management^[16-19]),1993~1994年,该技术首先在北亚得里亚海海上油田进行试验,试验井射孔没有采取附加的防砂手段,随着油井的产量提高,油井开始出砂,在试验初期出砂测试的情况如图 1-1 所示。

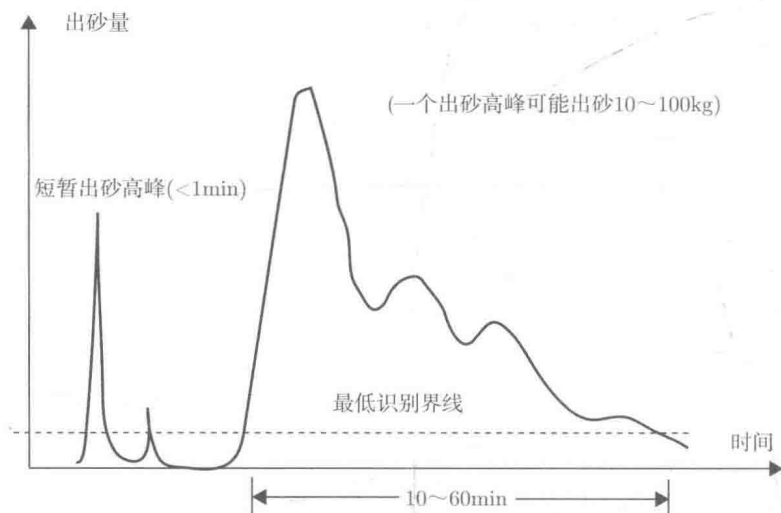


图 1-1 油井出砂量预测曲线

在图 1-1 中可以看出出砂量在开始生产 10~60min 内出现一个明显的峰值,峰值过后出砂量会稳定在一个比较低的水平。

继续进行测试有以下的试验结果:

- (1) 保持产量生产会伴随间断出砂而且出砂量不大,一般在 5~50 kg/d;
- (2) 出砂的时间会在 20~100 min,并且在 1 天内会随机出现;
- (3) 油井的表皮系数降到 -3 以下。

1996 年在北海油田也进行了试验,并获得了成功,这项技术被应用到了北海的其他几个油田;到 1999 年年底,适度出砂开采技术开始在北海油田得到广泛应用,其他很多油田也开始积极地进行探索实验。以北海某油田为例(图 1-2),该油田 3 个平台上 47 口油井采用了

适度出砂方法生产, 增产的幅度是 35%~40%, 这些油井没有采取昂贵的防砂技术, 完井费用比较低。其中有 12% 的油井产量没有提高也没有砂子产出, 其中一口油井增产了 182%。

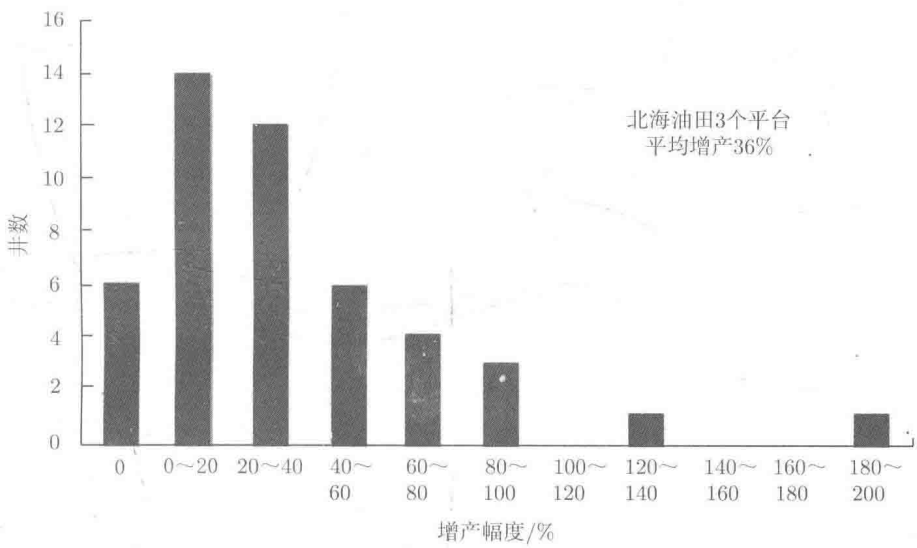


图 1-2 北海某油田 47 口井出砂生产增产比例图

(二) 国内研究情况

国内方面, 胡连印、沈秀通等人^[20] 于 1999 年提出了部分防砂的观点, 可概括理解为两点: 有限防砂和适度防砂, 其目的都是获得最大的油井生产效益, 生产过程中采用防砂与携砂相结合的生产策略, 即采用合理的防砂工具将大尺寸的储层砂挡在地层内, 允许细分砂随油流携出。这种新的防砂理论的提出打破了传统的观念, 为渤海地区稠油油藏的开发提供了一种新的、有效的思路, 并在 QHD32-6 油田和 SZ36-1 油田的调整水平分枝井中进行了应用证实。

2005 年, 曾祥林、邓金根等人^[21-27] 深入研究了适度出砂生产提高油井产能的机理, 为现场应用提供了理论依据。以现场储层砂样为例, 进行了室内的砾石充填及防砂实验, 探索了不同完井状况下生产压差、出砂与油井产能之间的相互关系, 以及“蚯蚓洞”网络的形成情况, 并对出砂规律及出砂对储层渗透率的影响进行了研究。

2005 年, 何冠军等人^[28] 建立了一维的出砂模型, 对不同的剥蚀系数、黏度、渗透率以及入口压差等对“蚯蚓洞”的形成发育、孔隙渗透率等的影响进行了实验研究, 并评价了这些影响油井出砂的主要因素。

第二节 多枝导流适度出砂技术初识

油气井生产过程中, 提高单井产量意味着提高生产压差和采油速度, 对于疏松砂岩稠油油藏就容易造成微粒运移及出砂, 长期以来人们一直研究如何控制出砂, 然而高产量和高效益常常伴随着严重的出砂问题。采取有效防砂措施是避免油井出砂一种重要方法, 但是该方

法费用昂贵,且会造成油井产量的降低。因此,仅仅依靠防砂远不能满足高效率油田开发的需求。国外的实验研究表明,可以放大砾石尺寸和地层砂的匹配关系,控制产出砂的粒度,这样不会造成砾石层的堵塞,并且可以提高油井的生产能力。

一、多枝导流适度出砂技术介绍

(一) 多枝导流技术简介

作为多分支井的一种特殊井型,多枝导流井在国内外油田尤其是海上稠油油田应用越来越广泛,成为油气田开发、提高采收率日益成熟的先进技术。与直井和水平井相比,多枝导流井可以更多地暴露储层,扩大与储层的接触面积,大幅度提高单井控制储量,减少开发井数,降低开发成本,提高油气井的效益,降低吨油开采成本,提高油田最终采收率和开发效果,实现海上油田少井高产的目标。海上平台的开采方式以及稠油油藏的渗流特点,决定了渤海海上稠油油藏的一个最佳开采井型是多枝导流井。

(二) 适度出砂技术简介

适度出砂生产是将防砂技术与出砂冷采结合并用的一种高效的油井生产方式,其通过对油井产能或产量进行优化评价,制定最优的出砂或防砂生产方案,即进行有限度、有选择的防砂,使油井在可能的最大生产速度下开采,而又不会对储层造成损害。基本原理就是:在易出砂储层或疏松储层的原油生产过程中,粒径不同的储层砂在原油的携带作用下发生运移,根据发生运移的储层砂的大小和分布,对大于或等于一定粒径的储层砂进行有选择的阻挡;这些粒径的储层砂发生堆积形成一种滤砂屏障,进而会阻挡粒径更小的储层砂的运移,达到部分防砂的目的。在储层砂形成这种滤砂屏障前,由于允许储层砂中粒径更小的那部分随原油运移,因此改善了井眼附近的储层物性,使油层产能得到了充分的发挥。由于允许部分地层砂产出,因此井筒中的油流要有充分的携砂能力,可以将储层中的砂粒携带到井口,从而防止了砂粒在井底或采油设备中沉积形成砂埋,影响油井正常生产;另外,地面设备要有足够能力处理产出砂,即油流含砂量要在适宜的浓度范围内。适度出砂开采的原理设计如图 1-3 所示:

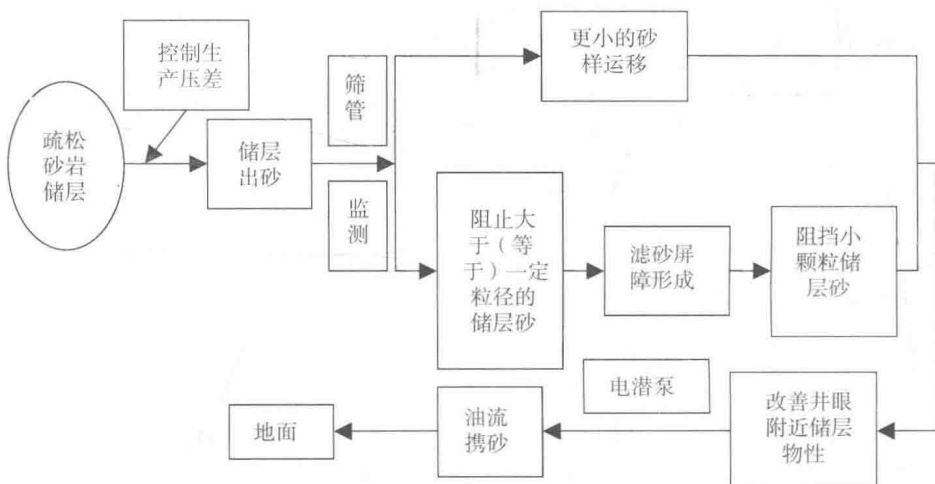


图 1-3 适度出砂生产的原理设计图

适度出砂的产能提高主要体现在两个方面：①地层出砂后容易形成“蚯蚓洞”，使得地层的可流动性大幅度提高，井筒的有效半径扩大，从而提高了流体的流速；②由于允许地层出砂，就可以适当放大生产压差，油井的产量可以得到提高。国内外现场和实验室研究有以下的结果：出砂量为 2.0%左右时，渗透率的增值为 10.8%~ 53.1%，平均值为 25.2%；出砂量相同（质量分数为 1%）时，粒径小于 39μm 的微粒对渗透率增加的贡献值最大，尤其是 26 ~ 39μm；出砂后渗透率增加明显，一般均大于 15%；控制粒径小于 39μm 的微粒出砂对渗透率的增加影响比较大，同时能够维持地层的稳定性。

国内外研究，砂粒越小，其砂粒间形成的孔隙越小，把小孔隙视为毛孔，毛管流动公式为

$$v = \frac{\gamma^2 \Delta p}{8 \mu L}$$

式中， v 为液体渗流速度，cm/s； γ 为毛管半径，cm； Δp 为毛管两端压差，MPa； μ 为液体黏度，mPa·s； L 为毛管长度，cm。

孔隙减小，原油流动速度呈二次方下降，原油流动阻力增加，即细粉砂对油层渗透率的降低影响较大，因此应该在原油流动速度超过油层临界速度的范围内，依靠原油的携砂能力，从近井眼地带中，排走油层细粉砂，地层孔道得到疏通，改善近井眼油层物性。

由于允许地层出砂，则可适当放大生产压差，提高油井产量。如图 1-4 所示，油井的临界产量随地层强度的提高而增大。在安全生产的前提下进行适度出砂的产量上限与地层强度也有相似的关系。在图 1-4 中明显可见，油井产量 Q_2 保持在临界出砂产量 Q_1 和安全生产上限产量 Q_3 之间时，油井在适度出砂的同时产量会得到提高。对于强度较高的砂岩地层，由于临界产量高，在同样出砂量的条件下产量提高的幅度会更大一些。

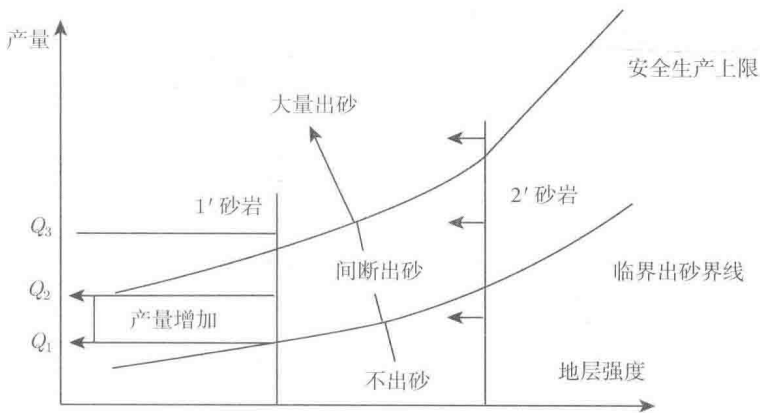


图 1-4 适度出砂提高产能示意图

二、适度出砂与防砂、出砂冷采的区别

防砂的标准是不让地层砂出来，冷采是无节制地允许地层出砂，而适度出砂管理正是介于两者之间的活动。从比较结果（表 1-1）看，该方法同防砂和冷采相比有独特的优势，通过控制地层适度出砂有效地提高了产量。就风险而言，防砂和出砂冷采是一种高成本 - 低风险

险的方案；而适度出砂成本低，但包含现行风险管理，需要采用科学管理方法在地层出砂上开展更加广泛和系统的研究，如地层的出砂规律及其与产能之间的关系，不同完井方法对储层出/防砂的影响，并筒带砂开采是否引起砂埋等，都是影响适度出砂技术应用效果的实际问题。

表 1-1 防砂、适度出砂、出砂冷采比较

防砂	适度出砂	出砂冷采
严防地层出砂	管理地层出砂	
降低产量	提高产量	
产油指数下降	产油指数随间歇式出砂而上升	
附加防砂成本	需砾石充填或筛管费用	对地层有特殊要求
无须处理产出砂	需要处理产出砂	大量出砂不易控制
发生堵塞	堵塞可以自我治愈	
表皮系数上升	表皮系数下降	
较透彻的认识	一项新技术	
无须风险管理	需要风险管理	

三、多枝导流适度出砂的适用条件

(一) 适用油藏条件

国外有关的研究机构和石油公司在多年研究和实验基础上，对适度出砂管理的油藏性质提出了各自观点。但是目前尚未形成公认的适度出砂管理的油藏筛选标准。一般认为 5 ~ 20MPa 强度的储层适合进行适度出砂开采方式，即岩石强度等级为弱固结这一级别(表 1-2)。1997 年，Tronvoll 和 Dusseault 等^[29,30] 根据油藏条件，将油藏分为不适用进行出砂管理的油藏、需研究论证才能进行出砂管理的油藏和适用出砂管理的油藏，并据此对不同特性的油藏进行出砂开采的适用性进行了分级。其中稠油油藏，特别是低产稠油油藏是实现适度出砂的首选油藏。稠油油藏一般具有较高的含油饱和度，而其中的弱胶结砂岩油藏又具有较高的孔隙度和渗透率。也就是说适合适度出砂的稠油油藏往往本身具有良好的物性条件，一般孔隙度大于 30%，渗透率大于 $0.5\mu\text{m}^2$ ，含油饱和度大于 60%。并认为孔隙度、渗透率以及含油饱和度低于上述值时，对适度出砂不利。

从最近几年国外油田的研究与应用情况看，该技术适用的油藏范围较广，对于油层厚度、原油黏度和油藏压力没有明显的限制，只要油层胶结疏松、地层原油中含有一定溶解气量，距边底水较远的稠油油藏均可采用该技术。

另外，要在疏松砂岩常规稠油油藏中实施适度出砂策略，需要对该油藏的自身性质、特点等进行分析，要对油藏进行筛选。仔细研究油藏埋藏深度、油层厚度、油层物性、油层压力、原油黏度与密度、原始溶解气油比、油藏胶结情况等。

适度出砂开发适用的油藏条件，大体上与出砂冷采的条件相一致，但它毕竟是对出砂进行控制的增产技术，因此与出砂冷采又有些不同。鉴于疏松砂岩常规稠油油藏适度出砂开发研究是一个新的研究领域，很多方面还没有达成共识，可供借鉴的经验也比较少，故仍需借鉴稠油出砂冷采的筛选条件。

国外有关研究机构和石油公司的研究人员经过多年的研究和实验，普遍认为，稠油出砂

冷采应具备如表 1-2 的条件:

表 1-2 适宜携砂冷采技术的油藏条件

油藏参数	要求	油藏参数	要求
储集层岩性	砂岩	含油饱和度/%	≥ 60
胶结状况	非胶结	原油密度 /(g/cm ³)	0.934 ~ 1.0071
泥质含量	较低	油层压力/MPa	≥ 2.4
埋藏深度 /m	300 ~ 800	脱气原油黏度/(mPa·s)	600 ~ 160000
油层厚度/m	≥ 3.0	气油比 /(m ³ /m ³)	0 ~ 40
孔隙度/%	≥ 2.5	边水、底水情况	无或远距离边底水
渗透率/10 ⁻³ μm ²	≥ 500	—	—

目前,国外稠油出砂冷采的油藏所采用的井距一般为 160 ~ 400m。

(二) 适用的生产阶段

(1) 新区。从理论上讲,适度出砂开发稠油油藏技术最好应用于未开发过的新区,从油田刚开始投入开发就进行整体研究、规划、设计和实施,这样可以取得最佳开发效果,充分发挥适度出砂技术的优势。从钻井井型、井网的合理布置到完井、配套设施的规划进行一体化研究,充分发挥油藏潜力,节约投入。

(2) 老区。国外也有在老区利用该项技术获得成功的例子。如 Husky 石油公司于 1994 年在 Black Foot 稠油油田 (埋深 600m, 原油密度 0.98g/cm³) 的低产和高含水井中下人螺杆泵进行出砂生产,取得了良好的增油降水效果,在换泵后不到半年时间,产量提高幅度达 1 ~ 6 倍,含水下降 10%~ 40%。

(3) 热采后期。我国河南油田进行过蒸汽吞吐后转出砂生产的现场试验,但是由于蒸汽吞吐轮次较高,油层压力和溶解气量大幅降低,造成出砂开发试验效果并不理想。因此选用蒸汽吞吐后转适度出砂生产的油藏时要注意油田的衰竭程度。

由于适度出砂采油方法是靠出砂来提高油井产量,即不出砂时油井产量很低或者开发效益低下。因此,除了上述油藏地质条件外,还必须配备携砂能力极强的采油泵和有关采油、集输工艺设施。

四、海上平台适度出砂“度”的确定

(一) “度”确定原则

油井防砂效果的评价主要取决于油井防砂后的产能、含砂浓度、有效生产时间和油井产能的保持程度。适度出砂“度”的控制将通过这 4 个指标来实现。

如果适度出砂的“度”较大,挡砂精度设计过大,则出砂量就会较大,按照出砂增产的机理,产能恢复得较多,但由于砂埋和砂磨蚀,造成的生产风险也会大大增加;反之,若适度出砂的“度”控制较小,挡砂精度设计过小,那么出砂量就小,但防砂后的产能降低则更多。因此,“度”的把握是适度出砂开采技术发挥最大效益的前提。

从地质和工程的角度,适度出砂“度”的控制应满足以下 3 个限制条件:

(1) 出砂不造成整个储层骨架的破坏,不会使储层段塌陷、掏空;

(2) 出砂有利于产生一个高孔隙度的扰动区,与液流一起使扰动区增长为一系列几何形态不确定的通道,这些通道像裂缝一样可提供一个低阻力的流动通道;

(3) 不超过地面设备的处理能力。

对于海上油田,由于受到工作场所(海上平台)的空间限制,产出砂的处理方式很受限制,含砂量的确定将会与陆上油田不同。

(二) “度”的确定方法

针对处理混砂原油的模式,通过图 1-5 的步骤确定海上稠油适度出砂开采的“度”:

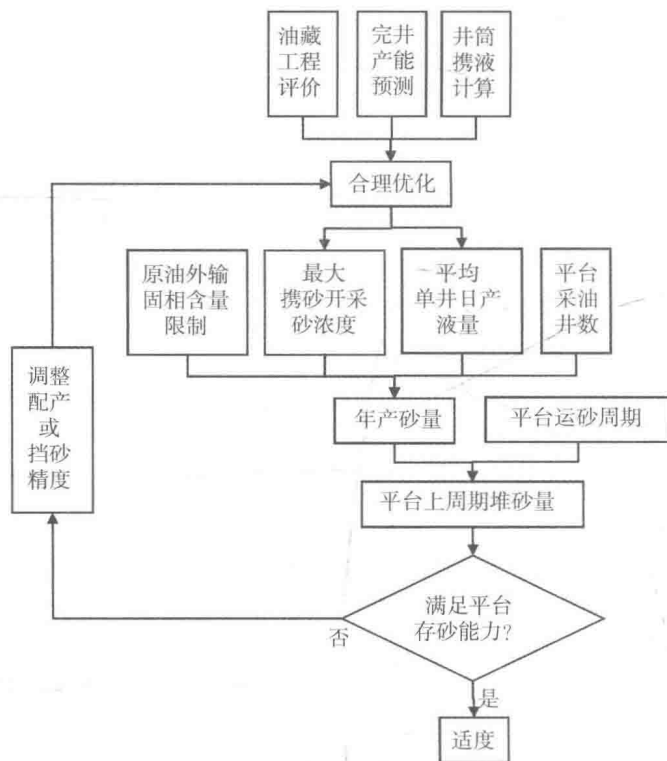


图 1-5 海上稠油适度出砂开采“度”的确定流程图

(1) 确定合理的配产和控砂完井方式。

(2) 根据携砂能力、日产量、平台总井数确定年产砂量。

(3) 根据平台运砂周期计算平台所需的周期存砂空间大小。

(4) 对比平台的现有存砂能力,如果能力偏低,表明出砂过多,一方面可以调整配产或挡砂精度,降低允许出砂量,但可能引起油井产能的下降;另一方面,可以改进平台的砂处理能力,增加存砂空间或增加运砂频率。

(5) 如果平台的存砂能力偏高,表明出砂量低于“度”,一方面可以调整配产或挡砂精度,在携砂能力允许的前提下提高最大出砂量,油井产能相应提高;另一方面,可以减少运砂频率,降低砂的处理费用。

按照产出砂的第二类处理模式,根据平台预留存砂体积的大小,结合出砂浓度和单井配产,计算适度出砂的“度”;或根据平台对混砂原油的处理能力,首先确定适度出砂的“度”,然后再确定合理的单井配产。

五、技术可行性

(一) 多枝导流技术

海上平台的开采方式以及稠油油藏的渗流特点,都决定了海上稠油油藏的最佳开采井型是多枝导流井。

多枝导流井增产的机理是,通过分枝井眼增加暴露面积,增加单井控制面积和单井产能;同时,在产量相同条件下,多枝导流井的生产压差低于水平井,可延缓稠油油田底水锥进,提高单井产能和采收率。

实验研究、模拟计算和现场实践证明,多枝导流井相对于水平井产能可提高 20%以上,是稠油油田提高单井产能、控制底水锥进的有效手段。

(二) 适度出砂技术

疏松砂岩稠油油藏几乎都面临着地层出砂的问题,出砂的原因也极其复杂,从钻井到采油或注水过程中,每一环节都对出砂有影响。出砂经常造成砂埋油层或砂卡抽油泵,致使油井不能正常生产。

目前的措施是采用完井手段将砂完全防住,而且防砂措施导致了附加表皮的增加,降低了油井的产能;同时,传统的防砂方式采用砾石充填完井,作业费用较高,因此,传统的防砂开采方式成了制约渤海稠油高效开发的重要因素之一。常规防砂开采采用严防死守的防砂理念,出砂冷采是无节制地允许地层出砂,而介于两者之间的“适度出砂”是基于传统的防砂思想,并综合了防砂开采和出砂冷采技术优势而建立起来的,适度出砂开采技术基于井筒携砂和地面设备允许含砂量,介于“防”和“放”两者之间的技术策略。采用该技术,通过适度出砂,可改善近井地带的地层渗透率,避免近井地带的堵塞,提高单井产能,同时还可以降低防砂完井的费用。该技术超越了传统的防砂完井的理念,通过控制油气井生产压差、产量(液流速度),结合适度防砂技术,达到油井高产和低成本的目的,是疏松砂岩稠油油藏提高单井产能和采收率的有效手段。

六、实施适度出砂提高产能的模式

综合国外出砂管理经验,出砂管理需要可靠的“地层砂生命周期”分析,即从预测引起出砂的地层条件开始,到产出物的地面最终处理结束。

(1) 油藏的可行性研究。我国疏松砂岩油藏分布广泛,油藏性质差异大,应对实施的区块进行对比分析,而不是满足一个或几个条件就认为可行,或认为一个或几个条件不满足就不行,需要根据整体情况,进行系统的综合分析。如渤海油藏实施适度出砂管理可选余地大,能满足实施要求,还要结合地质、油藏、工程等针对具体油藏进行综合的分析、判断。

(2) 广泛收集现场资料。不同油藏有不同的特点,其现场数据是最直接的,也是后续研究的依据,对油田开发的认识越广泛,资料越多,对于正确实施的指导意义越大。

(3) 相关物理过程的理论模型。预测出砂初始条件是传统的出砂预测,需要确定给定井眼和油藏压力下不同地层的出砂临界条件。出砂临界条件预测模型较多,有的模型尽管得到油田成功应用的报道,但需要具体情况具体分析。而出砂量预测模型可分为现场经验法、应力应变模型、“蚯蚓洞”模型和冲蚀模型,这些模型要经过广泛的现场验证才能和油田实际结合起来。

(4) 生产数据的现行监测与跟踪。受可控因素和非可控因素的影响,地下的情况有其复杂性,而表现出来的问题(如生产数据)是工程人员判断井下情况的最直接最有效的手段。因此,实施适度出砂的油田大都非常重视对生产数据的监测与跟踪,如地层出砂的地面监测等。

(5) 试井优化产能。通过试井,对适度出砂地层进行油气藏评价和生产动态测试,从而获得油气藏的压力系统、储层物性、生产能力动态预测以及判断油气藏的边界和估算储量等。

(6) 完井设计优化。以油井产量为目标,根据地层特点和原油性质等优选井的类型(直井、定向井和水平井);根据地层特点和开采技术要求,优选油井的完井方式;根据油田开发方案(配产要求、地层特点和原油特性、采油方式、增产措施等)优选油管 and 套管尺寸;以减少地层损害,提高油井产能为目标优化完井参数;进行适度出砂管理的投入产出的综合分析,优化方案。

(7) 井筒携砂技术。根据地层产能、油管尺寸、井型、完井方式、开采方式、砂粒粒径、砂量浓度以及携砂开采风险评价等进行井筒携砂技术的综合研究,如国外有些井采用气举开采方式提高油井携砂能力。

(8) 适度出砂生产条件下地面处理工艺技术。地面处理能力需要考虑在环境许可的情况下,地面允许的最大砂处理能力。当采用适度防砂措施后,产出液中含有一定量的油砂,为防止砂粒堵塞集输系统,产出液体不能直接进入管网,必须就地除砂。

(9) 油田矿场先导性试验。包括试验井的基础情况、试验生产效果和经济性评价。从收集到的资料看,几乎所有井都进行了先导性的现场试验,经历了一个摸索、实践、调整以及推广的过程。因为发生严重出砂的生产极限条件预测困难,所以只有现场实践才能提供该上限。另外,通过先导性的出砂试验可以了解地层的出砂特征,如北海油田利用出砂量现场数据建立了初始、累计和残余出砂量与时间近似呈抛物线关系。

(10) 整个油井开采期的风险评估。在出砂管理的开发后期,由于单井产状差异大,特高含水低产井影响油田开发效益。因此有必要优化管理,降低低产低效井的开发成本,最大限度地提高油田开发效益。

通过上述综合研究评定结果、工具以及工艺配套等进行油田的推广应用(图 1-6)。