

JIXIE FANGSHA
WANJING SHAIGUAN

机械防砂 完井筛管

董长银 刘永红 著

中國石化出版社
[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

机械防砂完井筛管

董长银 刘永红 著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书针对疏松砂岩易出砂油气藏的防砂问题,全面介绍了目前防砂完井筛管的基本原理和结构,阐述了有关机械防砂完井筛管的机理、性能、设计、模拟等理论与技术。主要内容包括机械筛管防砂完井及筛管结构原理、机械筛管防砂性能评价方法、机械筛管防砂完井优化设计方法、机械筛管应力及强度校核、机械筛管堵塞机理与动态产能评价、机械筛管井底工况模拟与寿命预测等。本书可供从事油气田开发尤其是防砂完井设计的工程技术人员、管理人员、科研人员以及石油院校教师、本科生、研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

机械防砂完井筛管 / 董长银, 刘永红著. —北京:
中国石化出版社, 2017. 6
ISBN 978 - 7 - 5114 - 4462 - 2

I. ①机… II. ①董… ②刘… III. ①机械防砂-完井
IV. ①TE358

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 109150 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号
邮编:100020 电话:(010)59964500
发行部电话:(010)59964526
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail:press@sinopec.com
北京科信印刷有限公司印刷
全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 13.5 印张 329 千字
2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷
定价:46.00 元

前 言

我国及世界上疏松砂岩油气藏分布广泛，目前其储量及产量仍占主要地位。由于疏松砂岩油气藏地层岩石胶结疏松，岩石强度较低，在油气开采过程中容易出砂，对储层、井筒设备、地面设备、生产管理造成极大的危害。出砂已经成为困扰疏松砂岩油气藏开发的主要棘手问题之一。对于出砂问题，防砂是主要解决途径。近年来，逐步发展了从机械到化学以及复合防砂等系列化的防砂工艺技术，国内外研究者也针对出砂与防砂问题开展了系列研究，形成了初步的油气井防砂理论与技术体系框架。

对于疏松砂岩易出砂油气藏，机械筛管是早期防砂完井或后期防砂中的关键井下设备，其主要作用是支撑井壁并起到挡砂作用。机械防砂筛管综合性能对于防砂完井效果及服务期限至关重要，关系到能否有效阻挡地层砂以及能否获得较高的防砂后产能，并且在生产过程中能够保持性能稳定维持长效生产。目前常用的机械筛管类型繁多，产品多样，性能各异，对于特定的油气藏防砂完井而言，对现有筛管进行综合性能评价与优选是一项十分重要的工作。目前，国内外尚无专门阐述机械防砂完井筛管的著作出版。

近年来，油气井防砂技术突飞猛进，各种新型筛管不断涌现。笔者所在的研究团队近年来也在油气井防砂领域开展了新的系列研究工作，其中涉及防砂完井筛管的研究主要集中在筛管挡砂机理和综合性能评价方法、机械筛管类型评价与优选、机械筛管挡砂精度优化设计方法、筛管井底综合工况模拟与寿命预测、机械筛管的强度校核分析、机械筛管堵塞机理与规律、机械筛管防砂完井动态产能评价等方面，基本囊括了近年来国内外机械筛管防砂技术与相关基础理论研究的最新进展。另外，在每部分技术内容的末尾收集整理了相应的计

算分析或现场应用案例。力求做到系统性、新颖性和实用性相结合。本书的出版将对普及机械筛管相关的基础理论知识和防砂技术具有积极作用,对提高现场防砂完井工程技术人员的技术水平和拓展视野具有重要意义。

本书由中国石油大学(华东)防砂完井实验室董长银教授、刘永红教授统筹编撰。本书的绝大部分技术内容受到了国家863计划项目(2006AA09Z351)、国家自然科学基金项目(50274055、50704035、51374226)的资助,以及胜利油田、青海油田、河南油田、大港油田、新疆油田、中海油服、南海西部等企业委托项目的资助;中国石油大学(华东)蒲春生教授、大港油田公司高级专家李怀文教授级高工审阅了书稿并提出了宝贵意见;《中国石油大学学报》(自然科学版)编辑李志芬女士、研究生高凯歌、钟奕昕、周玉刚等帮助进行了前期校对,在此一并表示衷心的感谢。另外,部分筛管产品资料来自于筛管制造公司的网站、宣传材料或技术手册等公开途径,未在书中一一说明,在此对所有资料来源方表示感谢。

受作者能力及学识水平所限,书中出现疏漏甚至错误之处敬请读者批评指正或提出宝贵意见(发送至 dongcy@upc.edu.cn)。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 油气井出砂及其机理	(1)
1.2 防砂与完井	(3)
1.3 机械防砂完井筛管及其性能评价	(4)
第 2 章 机械筛管防砂完井及筛管结构原理	(6)
2.1 防砂完井原理及其分类	(6)
2.2 机械防砂方法及挡砂机理	(8)
2.3 机械筛管及挡砂介质类型	(16)
2.4 主要机械筛管结构及原理	(17)
第 3 章 机械筛管防砂性能评价方法	(36)
3.1 机械筛管综合性能评价内容	(36)
3.2 筛管防砂性能测试实验	(38)
3.3 筛管防砂性能评价指标及其计算方法	(41)
3.4 筛管挡砂驱替实验过程分析	(45)
3.5 筛管防砂性能评价案例分析	(47)
3.6 筛管砾石充填情况下挡砂动态分析	(53)
第 4 章 机械筛管防砂完井优化设计方法	(60)
4.1 机械筛管防砂设计内容体系	(60)
4.2 地层砂粒度分析	(61)
4.3 固相充填材料尺寸设计	(71)
4.4 机械筛管类型评价与优选	(76)
4.5 机械筛管规格及挡砂精度设计	(82)
4.6 机械筛管防砂井射孔参数优化设计	(94)
第 5 章 热采条件下机械筛管应力及强度校核	(99)
5.1 热采井机械筛管热应力分析	(99)
5.2 热采条件下机械筛管强度变化规律	(112)
5.3 热采条件下机械筛管强度校核	(118)

5.4	热采水平井热补偿器设计及管柱优化	(129)
5.5	热采条件下机械筛管精度变化规律	(137)
第6章	机械筛管堵塞机理与动态产能评价	(145)
6.1	机械筛管挡砂介质堵塞机理	(145)
6.2	机械筛管物理堵塞规律及主要影响因素实验	(147)
6.3	机械筛管防砂井静态产能预测方法	(154)
6.4	基于堵塞规律的防砂井动态产能预测方法	(160)
6.5	机械筛管喷射解堵技术及实验评价	(166)
第7章	机械筛管井底工况模拟与寿命预测	(174)
7.1	机械筛管井底环境条件及损坏形式	(174)
7.2	机械筛管腐蚀机理及腐蚀速度预测	(175)
7.3	机械筛管腐蚀实验	(186)
7.4	机械筛管冲蚀机理及冲蚀速度预测	(190)
7.5	特殊工况对筛管稳定性影响	(195)
7.6	机械筛管服务寿命预测	(199)
参考文献	(204)

第 1 章 绪 论

1.1 油气井出砂及其机理

油气井出砂是指油井或气井在生产过程中,由于地质条件、开采方式以及措施作业等各种综合因素造成井底附近地层的岩石结构变化,导致地层离散砂或脱落砂被地层产出流体携带进入井筒或地面,从而对油气井正常生产造成一系列不利影响的过程或现象。

油气井出砂一般出现在疏松砂岩油气藏,出砂的严重程度与原始地层的胶结状态、流体物性(如流体密度、黏度等)以及生产条件(如井底流压、产量等)有关^[1-4]。产出砂粒径的大小取决于原始地层颗粒的粒径特征,如我国涩北气田产出砂粒径小于 0.07mm。储层产出砂的主要成分与砂岩颗粒成分相同,主要为二氧化硅和硅酸盐^[1]。

储层出砂会给油气井正常生产带来诸多不利影响。对储层及井底的危害主要表现为砂埋油气层造成产量降低甚至停产,出砂严重时会引起井壁坍塌而损坏套管或井筒砂堵造成停产,需要进行冲砂作业,增加生产成本;对井筒举升设备的危害主要表现在流体携带地层砂进入井筒举升设备,造成设备严重磨蚀、砂卡,缩短检泵周期,增加生产成本;对地面设备的危害体现在含砂流体会磨蚀井口设备和地面管线,并最终在油气处理罐中沉积,增大了设备更换及地面清罐等维修工作量。另外,传统的油气井筒流动一般为气液或油气水多相流动,井底出砂造成井筒流动引入了固相,使得井筒流动变为气固、气液固等更加复杂的多相流动;固相的引入不但改变了原有的流动机理,而且在井筒流动规律预测方面带来了更多的不确定性。总之,油气井出砂造成的危害不但提高了油气生产成本,而且大大增加了油气田管理难度。我国及世界上疏松砂岩油气藏分布广泛,油气井出砂已经成为困扰疏松砂岩油气藏开发的主要因素之一,成为提高开采速度的主要障碍和主要矛盾之一。

地层的微观出砂机理和形态与储层岩石强度类型和生产条件有关,因此,首先对储层岩石的胶结类型进行划分。疏松砂岩储层岩石精细化分为 I~V 类,分别为强固结地层、中固结地层、弱固结地层、半流砂地层和流砂地层。针对上述砂岩储层的精细化分,近年来发展了储层出砂的孔隙液化、类蚯蚓洞和连续垮塌 3 种微观出砂机理和形态,如图 1-1 所示。

孔隙液化出砂机理适用于砂岩油藏中固结地层或极端生产条件的强固结地层。此类地层孔隙多为微孔隙,渗透性差,所以在砂岩油藏开采过程中,地层中流体流速低,对岩石颗粒的拖拽力小。中固结地层的大部分岩石颗粒完全固结,固结强度高,地层流体流动产生的拖拽力不足以将固结强度高的固结砂剥落下来,但可以拖动液体流通通道中的填隙物(多为黏土)和小粒径未固结的岩石颗粒(游离砂),使流通通道中的填隙物和游离砂像

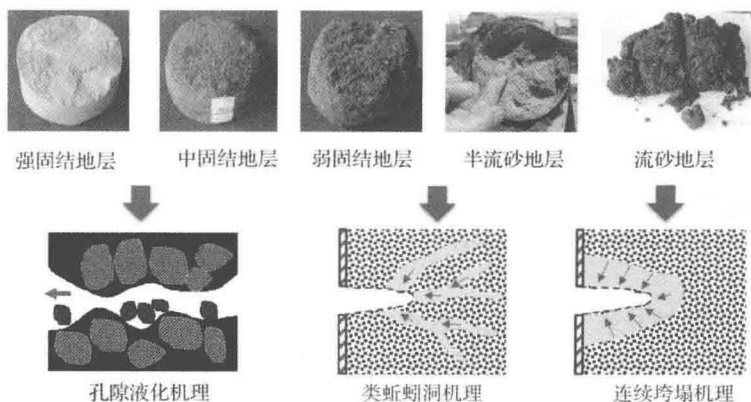


图 1-1 砂岩储层微观出砂机理与形态示意图

液体一样流动起来，直到进入井筒。强、中固结地层的出砂过程为固液耦合多孔介质流动，相当于一部分胶结较弱的微细颗粒变成流砂产出，储层孔隙基质部分“液化”，称为孔隙液化机理。近井储层的基本形态改变不大，出砂形态主要表现为近井地带增大的孔隙空间。

类蚯蚓洞出砂机理适用于砂岩弱固结地层或半流砂地层。对于弱固结地层，孔隙多为粒间孔隙，渗透性好，产量高，所以在砂岩油藏开采过程中，地层中流体流速高，对岩石颗粒的拖拽力大。地层流体流动产生的拖拽力首先将流通通道中的填隙物和一定粒径未固结的岩石颗粒（游离砂）携带进入井筒；弱固结地层的大部分岩石颗粒部分固结，固结强度低，流通通道畅通后，流体流速更高，对岩石颗粒的拖拽力更大，流通通道壁上的部分固结砂粒，在流体拖拽力作用下将被剥落下来，随流体流入井筒；弱固结地层的部分固结岩石颗粒从固结强度薄弱点开始被剥落后，将沿着流通通道壁开始延伸，而剥落的一定粒径的岩石颗粒被地层流体携带进入井筒，流通通道成为高渗透带，地层逐步形成类蚯蚓洞的出砂形态。所以，弱固结地层的出砂过程为岩石颗粒被剥落和孔道中的固液耦合多孔介质流动，形成的出砂形态类似于稠油出砂冷采形成的蚯蚓洞，称为类蚯蚓洞。

连续垮塌出砂机理适用于砂岩油藏半流砂地层和流砂地层。由于岩石颗粒大部分未胶结，为松散堆积介质，生产过程中地层产出流体很容易携带地层砂粒；且由于在井筒壁或射孔孔壁上的流速最高，流体携带出砂总是最先从井壁或孔壁开始，引起地层继续垮塌。随着岩石颗粒的不断垮塌，半流砂地层和流砂地层的出砂过程为未固结岩石颗粒连续发生垮塌、砂拱稳定，近井地层逐步向外被掏空，最终形成的出砂形态表现为近井地带的亏空。

储层出砂是一个非常复杂的固液流动过程。根据微观出砂机理或过程分析，储层出砂必须满足以下必要基本条件：

(1) 砂粒必须具备从岩石骨架或基质上剥落的条件，或者砂粒原本以游离砂形式存在。

(2) 砂粒从砂源地（即砂粒原始存在的地方）到井筒，必须具有比自身尺寸大的产出物理通道。

(3) 砂粒在产出通道中必须达到被流体携带的条件。

孔隙液化、类蚯蚓洞和连续垮塌 3 种微观出砂机理和形态并无明显的界限，而是随着储层地质条件以及不断变化的生产条件逐步变化和过渡；微观出砂的 3 个必要基本条件受诸多因素的影响，主要包括储层胶结状态和强度、砂粒尺寸及形状、地层流体物性、产量及流体流速（场）、储层孔喉结构及其变化、储层非均质性等。上述因素属于从微观角度分析影响出砂过程和规律的直接因素，这些因素体现在具体的油气井上，则反映在储层类型、地质条件、地应力、产量、生产压差、流体物性、完井方式、措施作业等多个方面，这属于影响出砂的表观因素。

1.2 防砂与完井

目前，防砂是解决油气田出砂问题的主要途径。防砂又称控砂，是指对于出砂的油气井采取合理的开采机制，或直接采取机械、化学等方法阻止地层产出砂进入井筒或人工加强井筒附近地层岩石的固结程度从而达到控制地层出砂目的的一系列措施。

在出砂问题涌现的早期，由于尚无专门防砂工艺，所谓的防砂措施主要是通过合理的开采机制控制出砂。通过制定合理的油气井工作制度，控制生产压差和产量，限制油气层中的渗流速度，从而减小流体对油气层砂岩颗粒的冲刷力，以达到防止地层出砂的目的。另外，根据油气层条件和开采工艺要求正确选择完井方法并改善完井工艺、加强出砂油气井的管理等也有利于防止地层出砂。

随着出砂问题的日益严重，以及对防砂技术的研究和应用，逐步发展了具体的针对性防砂工艺技术。对于出砂严重、通过调整生产机制和工作制度依然无法达到防砂目的的井，必须采取具体的防砂工艺措施。尤其对于处于开发中后期的油气田，迫于产量需要，很多情况必须采取具体的防砂工艺措施才能控制地层出砂。

传统上将防砂与完井视为两个不同的概念，实际上两者密不可分。防砂是针对出砂问题所采取的防控砂措施的总称。在防砂领域，根据实施防砂措施的时期不同分为先期防砂和后期防砂。而完井，则是根据油气层的地质特性和开发开采的技术要求，在井底建立油气层与油气井井筒之间的合理连通渠道或连通方式，是衔接钻井工程和采油（气）工程而又相对独立的一门技术工程。在完井领域，根据是否具有防砂功能将完井分为普通完井和防砂型完井。如果储层不出砂，完井时不需采用防砂措施，则为普通意义上的完井；如果油层出砂，需要在完井同时采取防砂措施，此时即为防砂完井（具有防砂功能的完井），而在防砂领域则称为先期防砂。如果储层早期不出砂，生产过程中出砂而采取防砂措施，则在防砂领域称为后期防砂。实际上，绝大多数疏松砂岩储层采取先期防砂完井。

防砂方法的基本原理分为两种。第一种原理为机械阻挡，通过井底挡砂手段将地层产出砂阻挡在地层或井底，阻止地层砂随流体进入生产管柱，比如机械筛管防砂，在井底正对生产层位悬挂机械滤砂管，滤砂管允许流体通过但可以阻挡地层砂，从而达到防止地层

砂进入井筒的目的；又如管内砾石充填防砂，在机械筛管与套管的环空充填砾石层，起到挡砂作用。第二种原理为化学固砂，即通过化学重新固结手段改善近井地带的地层胶结条件，提高固结强度，从而避免生产中出砂。此类防砂工艺有化学固砂、化学人工井壁防砂等。

油气井出砂与防砂工作贯穿于疏松砂岩易出砂油气藏开发全过程。油气田现场防砂工作主要涉及出砂预测、防砂工艺评价与优选、防砂施工参数设计、防砂井产能预测与评价、现场实施、防砂措施效果评价等环节，如图 1-2 所示。

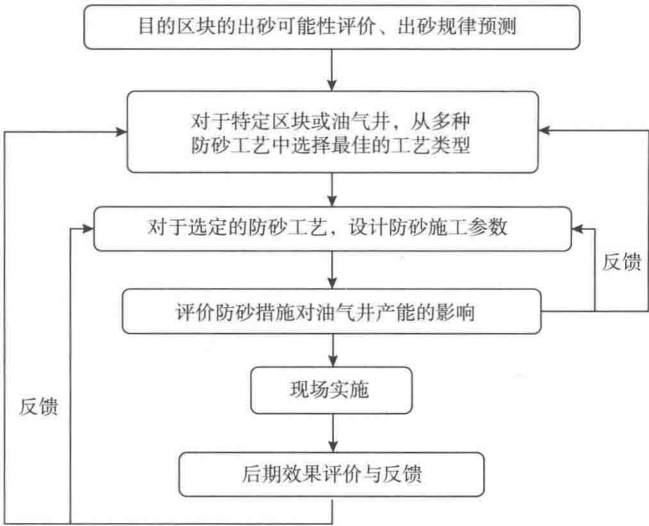


图 1-2 油气井防砂完井工作环节与流程

1.3 机械防砂完井筛管及其性能评价

对于疏松砂岩易出砂油气藏，防砂完井工艺综合决策是一项十分重要的工作，即根据储层岩石特征、流体物性、生产条件等预测出砂规律，评价与优选防砂完井工艺类型，优化防砂完井施工参数，准确预测与评价防砂后产能，合理评价实际防砂完井措施的效果并反馈改进上述决策过程的各个环节^[3,4]。防砂完井工艺综合决策包含 5 项内容：一是出砂趋势与出砂规律的预测与评价，二是防砂工艺类型的决策，三是具体防砂工艺参数的决策，四是防砂后的产能预测与评价，五是科学合理的效果评价与后期评估。

对于疏松砂岩易出砂油气藏，机械防砂机械筛管是早期防砂完井或后期防砂中的关键井下设备，其主要作用是支撑井壁并起到挡砂作用。机械防砂筛管综合性能对于防砂完井效果及服务期限至关重要，关系到能否有效阻挡地层砂以及能否获得较高的防砂后产能，并且在生产过程中能够保持性能稳定维持长效生产。目前机械防砂为主流防砂工艺，独立筛管防砂完井、各种砾石充填防砂完井、压裂充填防砂完井以及复合防砂完井等，都涉及到了机械筛管的选型及参数设计，尤其对于疏松砂岩油气藏的水平和大斜度井的裸眼井防

砂完井，机械筛管更起到至关重要的作用，如图 1-3 所示。

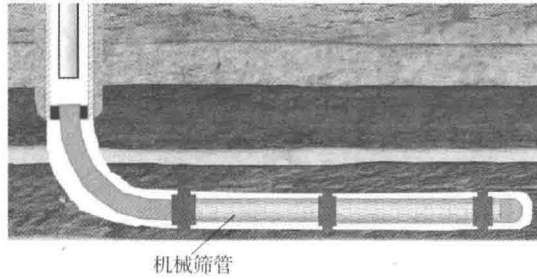


图 1-3 机械筛管在水平井防砂完井中的作用

目前常用的机械筛管种类繁多，产品多样，性能各异。对于特定的油气藏防砂完井，对现有筛管进行综合性能评价与优选是一项十分重要的工作。根据机械筛管从入井到寿命终止的整个生产条件，筛管可能承受来自于机械载荷、防砂失效以及腐蚀冲蚀损坏等方面的威胁，因此机械筛管性能的评价可分为机械性能、防砂性能和物理化学性能 3 个大的方面。

筛管的机械性能包括轴向抗拉和抗压、抗内压和外挤以及抗扭能力。对于一般的垂直井，筛管所受的机械载荷有限，发生机械损坏的可能性较低；而对于稠油热采水平井，尤其是砾石充填的情况，机械筛管在大幅度温变以及砾石包围的情况下，将承受较大机械载荷，有发生机械损坏的风险。因此，对于稠油热采防砂井，筛管的机械性能是必要评价项目之一。

机械筛管的防砂性能则包括流通性能、挡砂性能和抗堵塞性能。值得一提的是，任何井况的油气井，筛管的防砂性能评价都是其综合性能评价的必要内容之一。

筛管的物理化学性能是指筛管的抗腐蚀和抗冲蚀能力。对于有二氧化碳存在的井底环境（即使二氧化碳的含量很低），腐蚀是筛管损坏的重要因素之一；对于高产井，地层流体携带地层砂对筛管冲蚀也是导致筛管损坏的重要因素，尤其是海上油井更为明显。因此，对于具有冲蚀和腐蚀环境的油气井，物理化学性能评价就变得十分重要。

针对特定的油气藏，对机械筛管的上述性能进行模拟和评价，从而优选合适的筛管产品，并进行相应的系统优化设计，是一项十分重要的工作，也是防砂完井工艺综合决策的核心内容之一。

第 2 章 机械筛管防砂完井及筛管结构原理

目前油气田现场使用的防砂工艺技术多达几十种，其防砂原理、特点和适应性各异。其中绝大多数机械防砂涉及到机械防砂完井筛管的使用。针对特定井况和防砂工艺，如何考虑地层砂特征、生产条件、井底物理化学环境等诸多因素，科学合理地选择机械筛管类型和产品，是一个棘手的问题。本章主要介绍目前主流防砂工艺的分类以及各种防砂工艺的基本原理和特点，重点介绍机械防砂完井筛管的分类、结构和原理，以及机械筛管评价与优选的综合模糊评判方法。

2.1 防砂完井原理及其分类

2.1.1 防砂完井方法原理

无论对于先期防砂还是后期防砂，针对出砂问题的基本解决思路分两大类，一类是进行完全防砂，另一类则是基于携砂生产的排砂或疏砂，如图 2-1 所示。

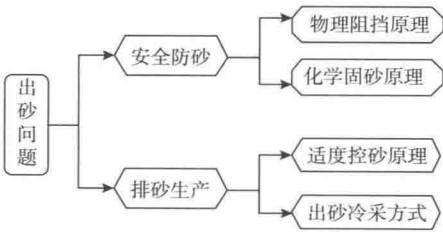


图 2-1 防砂方法的几种基本原理

完全防砂原理就是采用物理阻挡或化学固结的方法阻止或控制地层出砂。前者是通过井底挡砂手段将地层产出砂以物理（机械）方式阻挡在地层或井底，防止地层砂随流体进入生产管柱，而后者则是通过化学等手段改善近井地带的地层胶结条件，提高固结强度，从而避免生产中出砂。

对于出砂问题，目前另一种处理策略是排砂或疏砂，即对于难以有效控制的出砂储层放弃防砂措施，完全或部分允许地层砂产出，井筒中则采用携砂生产的方式进行，比如适度控砂策略允许部分较细的地层砂产出而阻挡较粗的地层砂，稠油出砂冷采则不采取防砂措施，任由地层出砂形成类似蚯蚓洞的孔洞增大储层稠油渗透性和流通性能。

目前针对出砂问题衍生的名目繁多的措施或工艺对策，基本均可以纳入图 2-1 所示的防砂方法原理体系，只是具体的挡砂机理、工艺过程各异。对于机械筛管，主要应用于物理阻挡防砂和适度控砂方面的机械防砂，其挡砂屏障主要为机械筛管本身，以及机械筛管外部的固相（砾石）材料充填层。其防砂原理如图 2-2 所示。

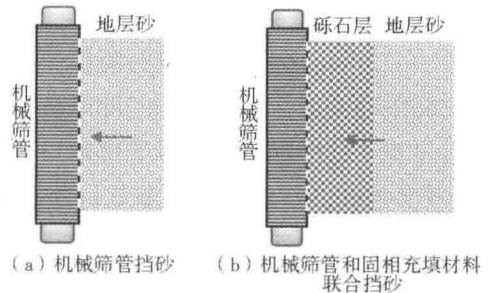


图 2-2 物理阻挡防砂原理示意图

2.1.2 防砂完井方法分类

在完井领域,无论对于垂直井还是水平井,其基本的完井方式均分为裸眼完井和射孔完井两大系列。在裸眼和套管射孔的基础上,根据不同的目的,衍生出了多种具体的完井方式。裸眼完井方式分为完全裸眼完井、裸眼机械筛管防砂完井、裸眼机械筛管外带封隔器防砂完井、裸眼膨胀筛管完井、裸眼筛管砾石充填完井等。套管射孔完井系列则分为套管/尾管射孔完井、套管射孔机械筛管防砂完井、套管射孔筛管砾石充填防砂完井、套管射孔管外管内一体化充填防砂完井等。这些完井工艺中使用机械筛管和砾石充填的目的是为了防止井壁坍塌和储层出砂,实质也属于防砂工艺的范畴,在防砂领域为先期防砂。

从防砂的角度而言,防砂方法体系的基本分类如图 2-3 所示。防砂方法分为机械防砂、化学防砂和复合防砂 3 大类,每类防砂方法中又分为若干小类,并包含不同的具体防砂完井方法或工艺。

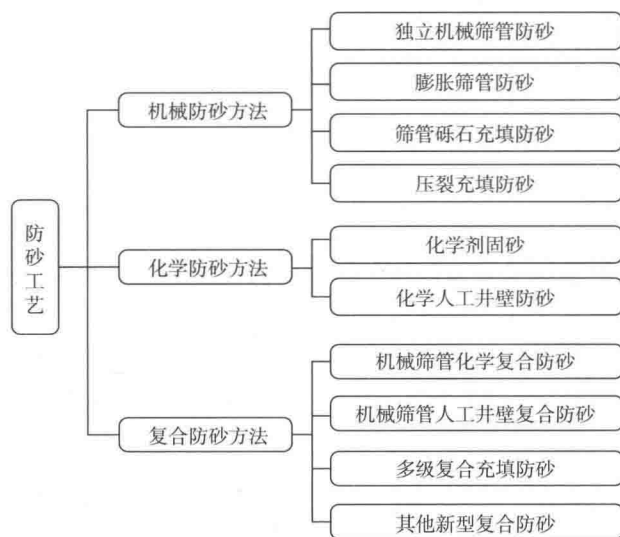


图 2-3 防砂方法基本分类

机械防砂方法是以机械物理阻挡的方式将地层产出砂阻挡在井筒外的防砂方法,挡砂介质主要有机械防砂筛管和砾石等固体充填材料。筛管缝隙和砾石充填层的多孔介质结构可以有效阻挡地层砂的产出而允许流体通过。根据挡砂介质和工艺的不同,机械防砂方法又分为独立机械筛管防砂、膨胀筛管防砂、筛管砾石充填防砂和压裂充填防砂 4 大类,每类又包含若干不同的具体防砂工艺。例如绕丝筛管防砂、高压一次充填防砂都属于机械防砂方法。目前在疏松砂岩油气藏防砂领域,机械防砂占绝对主流地位。

2.1.2.2 化学固砂方法

化学防砂是采用化学剂重新固结地层以达到提高地层固结强度从而防止地层出砂的防砂方法。一般是向地层中挤入一定数量的化学剂或化学剂与砂浆的混合物,达到充填、固

结地层、提高地层强度的目的。化学防砂主要分为化学剂固砂和化学人工井壁防砂两类方法。化学剂固砂是向地层注入树脂或其他化学固砂剂，直接将地层砂重新固结，达到防止地层出砂的目的。人工井壁防砂是将树脂砂浆液、预涂层砾石、水带干灰砂、水泥砂浆或乳化水泥等材料挤压充填至井筒周围地层，固结后形成具有一定强度和渗透性的人工井壁，达到防止地层出砂的目的。在油气井防砂技术的早期，化学防砂是主要的防砂方法之一。随着机械防砂技术的发展与应用，目前化学防砂已经成为辅助防砂工艺技术。

2.1.2.3 复合防砂方法

复合防砂是指机械防砂方法与化学防砂方法的复合，利用机械防砂和化学防砂的优点相互补充，一方面能在近井地带形成一个固结强度高、渗透性较好的人工固砂带，另一方面利用机械防砂管柱在井筒内形成二次挡砂屏障，起到很好的复合防砂效果。复合防砂效果好，有效期长，一般适用于单一防砂工艺难以起到有效防砂的井，或对防砂要求苛刻的情况。

2.2 机械防砂方法及挡砂机理

2.2.1 独立机械筛管防砂工艺

2.2.1.1 工艺原理

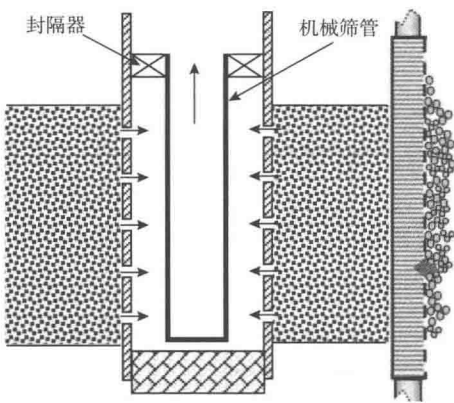


图 2-4 独立机械筛管防砂工艺示意图

独立机械筛管防砂是指将经过特殊工艺制成的具有滤砂功能的机械筛管用管柱和辅助工具直接悬挂在井内出砂层位，起到防砂作用，如图 2-4 所示。这种滤砂管具有较高的渗透性，允许地层流体通过但可以阻挡地层砂。地层产液必须流经滤砂管才能进入井筒流到地面。机械筛管不仅可以阻止直径大于滤砂器缝隙宽度（或孔隙、网孔直径）的地层砂，而且可利用“桥架”作用阻止小于滤砂器缝隙宽度的部分地层砂流入井筒。

目前油气田现场使用的机械筛管产品繁多，新的滤砂管也不断出现。现场上使用较多的机械筛管种类主要有绕丝筛管、割缝衬管、金属

棉滤砂管、精密复合筛管等。近年来国内外的油田服务公司相继开发出了各种新型滤砂管，主要包括 Excluder 系列筛管、HCC 筛管、PoroMax 筛管、MeshRite 筛管、STAR 星型筛管等。

2.2.1.2 独立机械筛管防砂的挡砂机理

独立机械筛管防砂仅在出砂层位井筒内下入机械筛管，在筛管与裸眼井壁或套管之间会留下一个未被充填的环空（相对于砾石充填的情况），如图 2-5（a）所示。而机械筛

管本身含有挡砂介质层，为形状和结构各异的多孔介质，具备挡砂功能。图2-5为独立机械筛管防砂挡砂机理示意图，主要包括筛管挡砂介质内部桥架挡砂机理和非充填空间分选桥架充填挡砂机理。

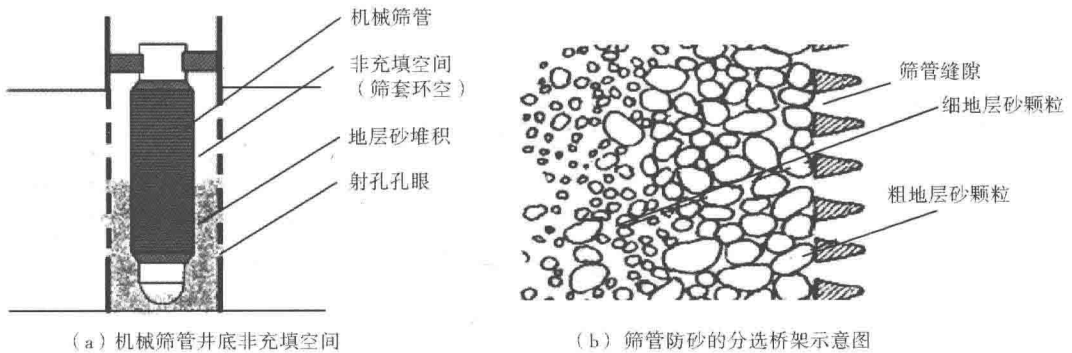


图2-5 独立机械筛管防砂挡砂机理示意图

筛管挡砂介质内部桥架挡砂机理^[5,6]是指当细质固相颗粒进入挡砂多孔介质内部时，挡砂介质孔隙的不规则性及非均质性导致进入的固相颗粒难以排出，滞留在挡砂介质内部，难以突破筛管挡砂层，最终阻挡地层砂。同时，筛管挡砂过程也是筛管介质被堵塞的过程，机械筛管的渗透率随着挡砂和堵塞进行逐步降低。

非充填空间的分选桥架充填挡砂机理^[6]是指筛管防砂施工完毕投产后，地层砂粒逐步在筛管与井壁或套管环空的非充填空间堆积堵塞，形成新的挡砂屏障，起到防砂作用。对于机械筛管防砂，施工后井内油层部位下入机械筛管阻挡从地层产出的地层砂，在筛管与套管之间形成环空，该环空及射孔孔眼内均无充填物充填，称为非充填带，如图2-5(a)所示。油井投产后，地层流体携带固相颗粒（地层砂及堵塞物）产出，固相颗粒会以分选桥架的机制充满机械筛管外部的非充填带，形成低渗透层，对油井造成堵塞，降低产量。所谓的分选桥架机制是指，地层砂伴随堵塞物随地层流体产出冲击防砂筛管。在生产初期，部分较细的固相颗粒进入筛管挡砂介质内部（或被继续排出或堵塞在挡砂介质内部），而粒径大于挡砂介质孔喉直径或缝宽的固相颗粒无法进入挡砂介质内部而被阻挡在筛管外部，较粗的颗粒堆积到一定厚度后，相当于形成了新的多孔介质挡砂层，但其孔喉尺寸更小，会阻挡更细的地层砂粒。以此类推，直到空间被完全充填，如图2-5(b)所示。从筛管向外部延伸，堵塞的颗粒粒径越来越小，其渗透性也越来越低，增加流动阻力，造成油井降产。

2.2.1.3 独立机械筛管防砂特点及适应性

独立机械筛管防砂工艺具有如下特点：

- (1) 工艺技术简单，施工方便，综合成本较低。
- (2) 机械筛管只能阻挡地层砂进入生产管柱，而不能阻止地层继续出砂；地层产出细砂会填充筛套环空及射孔孔眼，形成附加渗流阻力，降低产量。
- (3) 地层产出细砂及泥质常会堵塞机械筛管的渗滤介质，降低产量。

(4) 挡砂层较薄,挡砂精度有限,有效期短。

根据独立机械筛管防砂原理及其特点,独立机械筛管防砂属于简易防砂方法,适用于中粗砂地层的轻微或中等出砂;不适用于粉细砂防砂和地层出砂严重以及泥质含量较高的地层。当然,机械筛管种类繁多,根据其材料类型和制造工艺不同,其具体的适应性各不相同。

2.2.2 膨胀筛管防砂工艺

膨胀防砂筛管由一套防砂筛管组成,首先在井中下入可膨胀筛管,然后使用专门的工具,即锥形膨胀心轴(胀锥),使其膨胀。

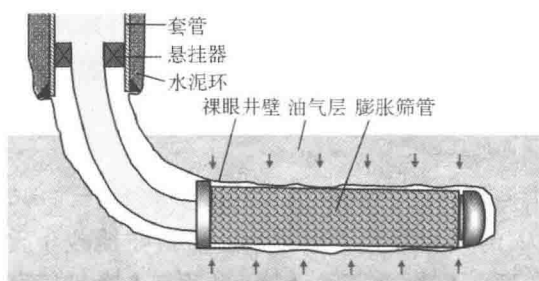


图 2-6 水平井裸眼膨胀筛管防砂完井示意图

当胀锥穿过防砂筛管时,防砂筛管在井筒中膨胀开来,直接紧贴在井壁或套管壁上。这样,既增加了地层井壁或套管的机械强度,大大降低了修井作业费用,同时又避免了常规筛管防砂完井时所形成的筛套环空,被地层砂堵塞后形成高渗流阻力带,影响产量,解决了环空堵塞、砂粒冲蚀等问题^[4]。水平井中的膨胀筛管防砂示意图如图 2-6 所示。

对于裸眼完井的水平井,钻开水平段后将膨胀筛管下入到生产层段,然后下入膨胀工具将筛管胀开,使其紧贴裸眼井壁,起支撑井壁和挡砂作用。这种防砂方法在防砂后获得的内径最大,增大了井筒泄流面积,并且膨胀筛管对井壁有支撑作用,有利于提高产能,而且其施工简单、安全可靠、投资回报率高。代表性的膨胀筛管有 ESS 膨胀筛管和 EX-Press 膨胀筛管。

膨胀筛管防砂工艺的技术优势主要有以下几点:

(1) 防砂筛管的膨胀实现了与套管的“零环空”,可降低套管的油层腐蚀,且过盈膨胀可提高套管的机械强度,延长套管的工作寿命。

(2) 能够降低生产压差,减缓筛管的冲蚀破坏,提高防砂筛管寿命和单井寿命,延缓底水的锥进,提高油气藏的采收率。

(3) 对于裸眼完井,“零间隙”环空可降低近井地带地层剥落及坍塌程度,减少地层微粒运移的数量,防止筛管堵塞,降低生产过程中的近井地带损害程度。

膨胀筛管防砂工艺的技术缺点主要有以下几点:

(1) 该技术投放市场时间短,其技术性能指标尚未得到实践的进一步检验,定性的数据多,定量的数据少,其可靠性和防砂效果尚需验证。

(2) 要求井眼规则,下膨胀筛管前要求获取全井段井径数据。在下筛管之前,必须用适当规格的通井规进行通井作业,筛管抗拉和抗扭能力薄弱,遇卡时活动能力受限制。

(3) 对套管固井射孔完井水平井,要求对射孔层段用刮管器进行刮管,并选用适当规