

油气井防砂理论 及其应用

何生厚 张琪 著

中国石化出版社

油气井防砂理论及其应用

何生厚 张琪 著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书围绕如何正确选择、评价防砂方法,以提高其效益的相关问题做了系统阐述,重点是介绍了与防砂综合决策相关的理论与方法。主要包括:油气层出砂机理与预测、油气井防砂方法原理、防砂井产能预测与评价、防砂方法选择、防砂工艺参数设计、水平井砾石充填模拟以及防砂综合决策系统的应用。本书可供从事采油工程的技术人员、管理人员、科研人员以及相关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气井防砂理论及其应用/何生厚,张琪著.
—北京:中国石化出版社,2003
ISBN 7-80164-339-9

I. 油… II. ①何… ②张… III. 油井防砂
IV. TE358

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 009736 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

850 × 1168 毫米 32 开本 7.125 印张 184 千字

2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

定价: 30.00 元

前 言

疏松砂岩油藏开采过程中的油井出砂是影响这类油藏开发的突出问题，防止油井出砂是开发疏松砂岩油藏的关键技术。此外，一些注水开发的砂岩油藏在开发初期油井并不出砂，随着含水上升油井出砂而制约油井正常生产。因此，无论疏松还是一些非疏松的砂岩油藏，开采过程中的防砂技术是开发这类油藏的重要技术。由于储层性质及开采条件的多样性以及科学技术进步，人们在开发实践中采取了多种防砂技术，但如何正确的选择应用这些技术使其发挥更大的效益却是一个有待继续深入总结和进一步研究的课题。易出砂油藏的防砂是一项涉及油藏地质、开发方式、开采工艺、开采成本等多方面的系统工程，制定出适应油藏地质特征、满足开发要求、工艺技术可行、经济有效的防砂方案无疑是十分重要的。制定方案是一项综合决策，必须采取科学的方法。

本书将介绍近几年来作者及其合作者们在总结和分析前人工作的基础上在这方面进行的最新研究成果，以期为正确的制定防砂方案提供必要的方法及其理论依据。本书除介绍出砂机理及出砂预测方法及对现有防砂方法的原理与评价外，重点阐述各类防砂井的产能预测与评价、防砂方法优选模型、防砂工艺参数优化设计方法以及水平井砾石充填数值模拟等以往我国防砂技术研究中较少涉及，而对防砂技术的正确运用有重要意义的几个方面，如引用了国家自然科学基金“水平井砾石充填动态模型与应用研究”的阶段性研究成果“水平井砾石充填数值模拟方面的内容。我国在防砂技术方面取得了大量的应用成果和成功的经验，而以往的研究主要偏重于出砂机理，出砂预测，挡砂技术、工具、工艺

过程，发表了大量的论文，并在相应的专著中有所阐述。本书则着重于涉及防砂方法选择及工艺参数优化设计的基本方法和理论，以弥补以往研究中的不足。书中还介绍了防砂综合决策系统这一最新成果。本书所介绍的理论和方法未必都是成熟的，但其目的之一是在于“抛砖引玉”，以期引起同行们对其基础理论和设计计算方法研究的重视，以便把我国防砂技术提升到一个新的水平。书中有不妥之处，请予以指正。

参加本书撰写的还有石油大学(华东)的董长银、曲占庆、李爱芬同志。在撰写本书过程中引用了胜利油田孤岛采油厂于明祥、肖建洪、陈耀武，中石化石油勘探开发研究院李贵恩及石油大学(华东)张红玲、李志芬诸同志提供的部分资料及研究成果，沈琛同志对本书进行了审阅。在此向他们表示深切的谢意。

目 录

第一章 疏松砂岩油藏出砂机理及出砂预测方法·····	(1)
1.1 油气层出砂原因 ·····	(1)
1.1.1 地质因素 ·····	(4)
1.1.2 开采因素 ·····	(6)
1.1.3 完井因素 ·····	(9)
1.2 油层出砂机理 ·····	(11)
1.3 岩石的破坏准则 ·····	(12)
1.4 出砂预测方法 ·····	(14)
1.4.1 现场观测法 ·····	(14)
1.4.2 出砂经验预测方法 ·····	(15)
1.4.3 井壁应力分析法 ·····	(19)
1.5 临界生产压差计算 ·····	(22)
1.6 出砂临界流量计算 ·····	(23)
第二章 防砂方法原理·····	(25)
2.1 防砂方法分类 ·····	(25)
2.2 机械防砂 ·····	(28)
2.2.1 滤砂器防砂原理 ·····	(28)
2.2.2 筛管砾石充填防砂机理 ·····	(33)
2.3 化学防砂 ·····	(35)
2.3.1 人工胶结固砂方法 ·····	(35)
2.3.2 人工井壁防砂方法 ·····	(35)
2.4 复合防砂 ·····	(37)
2.4.1 常规机械-化学复合方法 ·····	(37)
2.4.2 高渗压裂充填防砂 ·····	(38)

第三章 防砂井产能预测与评价	(40)
3.1 概述	(40)
3.2 防砂井产能基本模型	(40)
3.2.1 防砂井流动区域及流动压降计算	(41)
3.2.2 筛套环空砾石层压降计算的锥形流模型 ...	(45)
3.2.3 各区域的表皮系数计算	(49)
3.2.4 防砂油井产能基本模型	(52)
3.3 产能基本模型在复杂条件下的修正	(54)
3.3.1 射孔炮眼状况	(54)
3.3.2 射孔压实带	(55)
3.3.3 井斜校正	(56)
3.3.3 部分射开校正	(56)
3.3.4 地层非均质性校正	(57)
3.3.5 地层伤害校正	(57)
3.4 防砂井产能评价与预测方法	(58)
3.4.1 评价指标	(59)
3.4.2 评价指标的计算	(59)
3.4.3 各种防砂方法下相关表皮系数计算	(60)
3.4.4 防砂井产能预测方法	(63)
3.4.5 油水两相防砂井产能预测	(65)
3.5 防砂井产能影响因素分析	(67)
第四章 防砂方法优选	(69)
4.1 概述	(69)
4.1.1 防砂方法选择中存在的问题	(69)
4.1.2 防砂方法优选的基本思路	(70)
4.2 防砂工艺适应条件及其知识库的建立	(71)
4.2.1 影响防砂效果的因素分析	(71)
4.2.2 各种防砂方法的适应条件	(76)

4.2.3 防砂方法技术评价考虑的因素	(82)
4.2.4 防砂方法适应条件知识库的建立	(82)
4.3 防砂工艺技术评价的综合模糊评判模型	(83)
4.3.1 模糊集合、隶属度与隶属函数的基本 概念	(83)
4.3.2 模糊集合的划分及隶属函数的确定	(85)
4.3.3 权重系数	(86)
4.3.4 综合模糊评判模型	(87)
4.4 防砂方法技术评价的人工神经网络模型	(90)
4.4.1 技术思路	(90)
4.4.2 数据归一化处理	(91)
4.4.3 B-P 网络结构的确定	(92)
4.4.4 算例	(93)
4.5 不同防砂工艺的相对经济对比	(95)
4.5.1 防砂完井工艺经济评价的特殊性	(95)
4.5.2 不同寿命方案的经济对比模型	(97)
4.5.3 防砂与不防砂情况下的相对经济对比	(99)
4.5.4 防砂措施经济评价考虑的因素	(100)
4.5.5 经济指标计算	(100)
4.6 最佳防砂方法的确定	(103)
第五章 防砂工艺参数优化设计	(104)
5.1 地层砂特性分析方法	(104)
5.2 筛管砾石充填防砂工艺参数设计	(106)
5.2.1 几个基本概念	(106)
5.2.2 砾石充填孔喉结构数值模拟	(107)
5.2.3 地层砂侵入砾石层的实验研究	(116)
5.2.4 砾石尺寸优选	(122)
5.2.5 绕丝筛管尺寸设计	(127)

5.2.6	筛管砾石充填管柱设计	(129)
5.2.7	防砂用液及砾石量计算	(130)
5.2.8	最小临界排量及最高泵压计算	(134)
5.2.9	砾石充填施工工艺原理	(139)
5.2.10	改善斜井砾石充填效果的措施	(142)
5.3	滤砂器防砂工艺参数设计	(143)
5.3.1	树脂石英砂滤砂管参数设计	(143)
5.3.2	金属棉滤砂管参数设计	(145)
5.3.3	陶瓷滤砂管参数设计	(146)
5.3.4	冶金粉末滤砂管参数设计	(147)
5.3.5	割缝衬管防砂设计	(147)
5.3.6	绕丝筛管防砂设计	(149)
5.3.7	双层预充填绕丝筛管	(150)
5.4	化学剂固砂防砂设计	(150)
5.4.1	几个术语	(150)
5.4.2	化学剂溶液用量计算	(151)
5.4.3	辅助用液量及排量确定	(156)
第六章	水平井砾石充填数值模拟	(158)
6.1	概述	(158)
6.2	水平井砾石充填过程及堵塞机理	(159)
6.2.1	水平井砾石充填过程及特征	(159)
6.2.2	提前堵塞机理	(162)
6.2.3	影响水平砾石充填效果的因素	(163)
6.3	变质量条件下圆管中砾石充填过程模拟	(165)
6.3.1	颗粒运动的状态概率	(165)
6.3.2	砂床平衡高度计算模型	(169)
6.3.3	存在管壁滤失条件下砂床运移模拟	(172)
6.4	水平井砾石充填数值模型	(175)

6.4.1 质量守恒方程	(175)
6.4.2 动量守恒方程	(181)
6.4.3 辅助方程	(191)
6.4.4 水平井砾石充填数值模型	(193)
6.4.5 水平井砾石充填的可视化模拟结果	(194)
6.5 数值模型的应用	(197)
第七章 防砂工艺综合决策系统及应用	(199)
7.1 系统结构及组成	(199)
7.2 系统功能	(199)
7.2.1 基础数据管理	(201)
7.2.2 防砂方法优选	(201)
7.2.3 防砂井产能预测	(205)
7.2.4 防砂井经济评价	(207)
7.2.5 防砂工艺优化设计	(209)
7.2.6 水平井砾石充填数值模拟	(209)
7.3 系统应用	(212)
参考文献	(214)

第一章 疏松砂岩油藏出砂 机理及出砂预测方法

判断油层是否出砂，对于选择合理的完井方式、对经济有效地开采油田是非常重要的。要判断生产过程中是否出砂，必须对影响出砂的因素、出砂机理、出砂预测方法的准确性有比较清楚的认识。通过室内实验和理论研究，搞清油层出砂机理和规律，制订合理的生产制度和防范措施也就显得非常有意义。

1.1 油气层出砂原因

影响地层出砂的因素大体划分为三大类，即地质因素、开采因素和完井因素。第一类因素由地层和油藏性质决定(包括构造应力、沉积相、岩石颗粒大小、形状、岩矿组成、胶结物及胶结程度，流体类型及性质等)，这是先天形成的，当然在开发过程中，由于生产条件的改变会对岩石和流体产生不同程度的影响，从而改善或恶化出砂程度；第二、三类因素主要是指生产条件改变对出砂的直接影响，很多是可以由人控制的，包括油层压力及生产压差，液流速度，多相流动及相对渗透率，毛细管作用，弹孔及地层损害，含水变化，生产作业及射孔工艺条件等。通过寻找这些因素与出砂之间的内在关系，可以有目的地创造良好的生产条件来避免或减缓出砂。

地层砂可以分为两种，即：骨架砂和填隙物。骨架砂一般为大颗粒的砂粒，主要成分为石英和长石等，填隙物是环绕在骨架砂周围的微细颗粒，主要成分为粘土矿物和微粒。在未打开油层之前，地层内部应力系统是平衡的；打开油层后，在近井地带，地层应力平衡状态被破坏，当岩石颗粒承受的应力超过岩石自身

的抗剪或抗压强度，地层或者塑性变形或者发生坍塌。在地层流体产出时，地层砂就会被携带进入井底，造成出砂。

图 1-1 是射孔造成弱固结的砂岩破坏的示意图。射孔使炮孔周围往外岩石依次可以分为颗粒压碎、岩石重塑、塑性受损及变化较小的较小受损区。远离炮孔的 A 区是大范围的弹性区，其受损小，B1 ~ B2 区是一个弹塑性区，包括塑性硬化和软化，地层具有不同程度的受损，C 区是一个完全损坏区，岩石经受了重新塑化，近于产生完全塑性状态的应变。紧挨炮孔周围的岩石受到剧烈震动被压碎，一部分水泥环也受到松动损害。

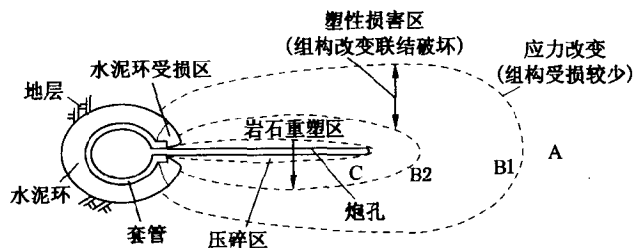


图 1-1 炮眼周围地层受损情况

从力学角度分析，这种条件下的油层出砂机理，为剪切(压缩)破坏机理，力学机理是近井地层岩石所受的剪应力超过了岩石固有的抗剪切强度。

形成剪切破坏的主要因素是油藏压力的衰减或生产压差过大，如果油藏能量得不到及时补充或注水效果差或者生产压差超过岩石的强度，都会造成地层的应力平衡失稳，形成剪切破坏。

拉伸破坏是地层出砂的另一机理。在开采过程中，流体由油藏渗流至井筒，沿程会与地层颗粒产生摩擦，流速越大，摩擦力越大，施加在岩石颗粒表面的拖曳力越大，即岩石颗粒前后的压力梯度越大。图 1-2 为这种机理的微观模型示意图。

流体对岩石的拉伸破坏在炮眼周围是非常明显的，由于过流

面积减小, 流体在炮眼周围形成汇聚流, 流速远大于地层内部, 另外, 近井地带流体易脱气, 粘度增大, 对岩石颗粒的拖曳力也会增加。

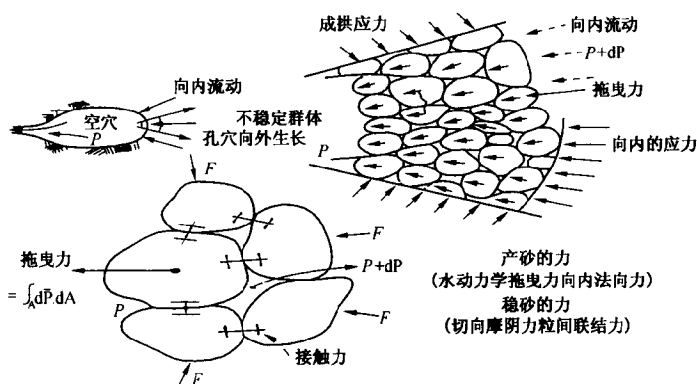


图 1-2 拉伸破坏微观模型示意图

实际上, 剪切和拉伸两种机理将同时起作用且会相互影响, 受剪切破坏的地层会对流体的拖曳力更加敏感。当剪切破坏是主要机理的情况下, 流体流动对携带颗粒进入到井里也是很重要的。

因为油层的射孔参数变化大, 因此, 井底压降与开采速度的关系具有不确定性。在一定的开采速度下, 增加孔数将减小每个孔的流量, 亦即降低了每个孔内的流体拖曳力。

一般来说, 地层的剪切破坏是灾难性大量产砂(以吨计)的机理, 而拉伸破坏则是较少灾难性的。这因为当炮孔增大后, 流速梯度降低, 从而使出砂程度减小, 因此拉伸破坏具有“自稳定”效应。

在疏松砂岩油藏, 地层内部存在着大量的自由微粒, 微粒运移是地层出砂的另一机理。在流体流动时, 微粒会在地层内部运

移，直至井筒。如果这些微粒在被地层孔喉阻挡后，会使流体渗流阻力局部增大，增大了流体对岩石的拖曳力，未被阻挡的更细微粒随流体进入井筒，造成出砂。

1.1.1 地质因素

(1) 构造应力的影响

由岩石力学理论可知：在疏松砂岩地层中只要完成钻井，则在井壁附近总是存在一个塑性变形地带，塑性带的稳定条件是：

$$\sigma_1 - p_0 = 2S_0 \tan \beta \quad (1-1)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{4} \quad (1-2)$$

式中 σ_1 ——最大主应力，MPa；

p_0 ——地层孔隙压力，MPa；

S_0 ——岩石固有剪切强度，MPa

β ——破坏角；

α ——内摩擦角。

对于疏松砂岩，一般地

$$S_0 \leq 0.5 \text{ MPa}$$

$$\alpha = 60^\circ \sim 65^\circ$$

则(1-1)式右端 $\leq 2 \text{ MPa}$

左端表示岩石颗粒承受的有效径向应力，可见(1-1)式左端径向应力 $\sigma_r > 2 \text{ MPa}$ ，则会破坏其稳定条件，使塑性半径向外扩张，即骨架结构失去平衡，开始出砂。

由于在断层附近或构造部位，原构造应力很大，已经局部破坏了原有的内部骨架(已产生局部天然节理和微裂隙)，故 S_0 更低。换言之，这些部位是地层强度最弱的部位，也是最易出砂的部位和出砂最严重的地区。断层附近或构造顶部区域是出砂最剧烈的区域，而远离断层和构造低部位区域出砂程度相对缓和，在胜利、中原及其他油田发现相似的规律。因此，在防砂治砂过程中，对这个区域要加倍重视，采用全面合理的防范措施。

(2) 颗粒胶结性质

颗粒胶结程度是影响出砂的主要因素,胶结性能是否良好又和地层埋深,胶结物种类、数量和胶结方式、颗粒尺寸形状密切相关。表示胶结程度的物理量是地层岩石强度。

一般的说:地层埋藏越深,压实作用越强,地层岩石强度越高,反之亦然,这就是浅层第三系油气藏易出砂的原因之一。

关于胶结物,主要是看其种类。钙质胶结为主的砂岩较致密,地层强度高。而以泥质胶结的砂岩较疏松,强度较低(此外泥质胶结物性能不稳定,易受外界条件干扰而破坏胶结)。胶结方式中以孔隙式胶结性能最好,其它如孔隙-接触式、接触式的胶结强度较低。颗粒的大小,形状及分选性也影响胶结强度,细的分选差而带有棱角的颗粒其胶结较好(其它条件相同时),反之粗颗粒分选好的圆颗粒则表现为弱胶结。

薄片分析结果表明,如果砂岩颗粒为点接触,油层压实作用较弱,地层胶结类型为接触式,胶结物以粘土矿物为主,地层的这些性质决定了地层具备地层出砂的内在条件。

从岩石力学的角度分析,地层的胶结性质直接影响了岩石颗粒固有的剪切强度(见图 1-1),低的地层强度是造成地层出砂的主要内在因素。

高岭石在地层的结构中多以自由状态存在,易于运移,是地层中自由颗粒的主要组成成分,因此,地层的这一特点应在认识出砂规律和进行防砂中高度重视。

(3) 流体性质

岩石的固结力还包括地层流体与颗粒之间的毛细管作用力。若含油饱和度越高,则胶结较好(其它对比条件相同),反之若含油饱和度低,则胶结程度下降。这是因为油相颗粒界面张力较大的原故。当然原油粘度也对胶结强度产生影响,稠油的毛细管作用力小于稀油。

此外,毛管作用力大小还受颗粒表面润湿性的影响。若强亲

水, 则易与水牢固结合, 内聚力就增加。

原油性质较差, 在生产中, 施加在岩石颗粒上的拖曳力大, 易造成出砂。

1.1.2 开采因素

(1) 地层压降及生产压差对出砂的影响

上覆岩层压力是靠孔隙内流体压力和岩石本身的强度来平衡的。随着开采过程的进行, 油藏压力一般会下降。若为衰竭势开采方式, 油藏压力会急剧下降, 因上覆岩层压力不变, 油藏压力的下降导致施加在岩石颗粒上的力越来越大, 当其超过地层强度时, 岩石骨架会破坏, 在液体流动条件下将地层颗粒携至井底, 引起出砂。

油藏压力下降对地层出砂的影响表现在:

压降过大使岩石颗粒的负荷加大, 造成了岩石的剪切破坏, 导致地层大量出砂; 当油藏压力低于原油饱和压力后, 将出现层内脱气, 形成油气两相流, 使地层对油相的相渗透率显著下降。此时, 脱气还使原油粘度提高, 两方面综合作用便增加了油流阻力(严重时会产生气顶), 欲保持产量不变, 必须提高生产压差, 导致出砂情况更加恶化; 油层压力的下降总是伴随边、底水(或注入水)的侵入, 从而在层内出现油(气)、水多相流, 同样使油相渗透率急剧下降, 不得不放大生产压差来维持产量, 势必产生出砂加剧的后果。

(2) 流速对出砂的影响

假定炮孔可简化为一圆柱和一半球的组合, 炮孔的前端为圆柱状, 顶端为半球状。研究表明炮孔球状顶端的流体压力梯度要比圆柱前端的流体压力梯度大, 容易破坏。假设岩石遵循Mohr-Coulomb破坏准则, 得出无砂生产的极限产量为:

$$\frac{q\mu}{4\pi kl} = \frac{4C\cos\alpha}{1 - \sin\alpha} \quad (1-3)$$

式中 q ——流量;

l ——从球心到地层的距离；

k ——地层的渗透率；

μ ——流体粘度；

α ——内摩擦角；

C ——岩石的胶结强度。

对于疏松砂岩易出砂的地层，常常存在速敏问题，当油层内流体流速低于临界流速时，实验研究发现尽管也会产生微粒的运移，但是它们会在弹孔入口处自然形成“砂拱”，可以进一步阻止出砂。但是随流速的增加，砂拱尺寸不断增大，稳定程度降低（砂拱越小越稳定），当 $V = V_C$ 时，砂拱平衡完全被破坏，无法再形成新的砂拱，砂粒可以自由流入井筒，开始出砂。

如流速进一步增加（ $V > V_C$ 时），其带来的后果只能是加剧出砂。根据实验研究，在一定流速范围内，出砂量随流速线性增加。

(3) 含水上升或注水对出砂的影响

含水对出砂的影响可归结为以下几方面：

(a) 含水上升使地层颗粒间原始的毛细管力下降，导致了地层强度的降低；

(b) 由于胶结物被水溶解，特别是一些粘土矿物，如蒙脱石等，遇水后膨胀、分散，大大降低了地层的强度；

(c) 注水对地层的冲刷作用会导致地层强度降低。

从岩石力学的角度分析，注水后，油层强度降低是必然的。首先，注水后，含水上升，使地层原始强度降低，即地层的内聚力降低，另外，注水的反复冲刷，导致岩石发生拉伸破坏，加剧地层的出砂。

(4) 地层伤害的影响

在钻井、完井、采油、作业过程中或者由于工作液固相颗粒含量高，或者由于入井液与地层及地层流体不配伍，都会在井底附近对油层造成一定的伤害，主要伤害类型包括：弹孔及地层孔