



中国石油大学(华东)
学术著作出版基金重点资助

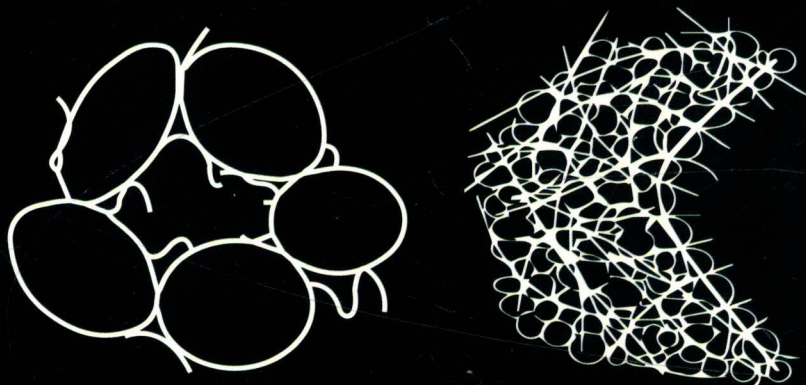
疏松砂岩油气藏 化学防砂理论与技术

THEORY AND TECHNOLOGY OF CHEMICAL SAND CONTROL
IN UNCONSOLIDATED SANDSTONE OIL AND GAS RESERVOIRS

齐 宁 著

石油石化
学术文库

THE ACADEMIC LIBRARY
OF PETROLEUM AND
PETROCHEMICALS



疏松砂岩油气藏 化学防砂理论与技术

THEORY AND TECHNOLOGY OF CHEMICAL SAND CONTROL
IN UNCONSOLIDATED SANDSTONE OIL AND GAS RESERVOIRS

齐 宁 著

图书在版编目(CIP)数据

疏松砂岩油气藏化学防砂理论与技术/齐宁著. —
东营:中国石油大学出版社,2018.5

ISBN 978-7-5636-5192-4

I. ①疏… II. ①齐… III. ①砂岩油气藏—油井防砂
IV. ①TE358

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 154821 号

书 名: 疏松砂岩油气藏化学防砂理论与技术
作 者: 齐 宁

责任编辑: 高颖(电话 0532—86983568)

封面设计: 悟本设计

出 版 者: 中国石油大学出版社

(地址: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号 邮编: 266580)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子邮箱: shiyoujiaoyu@126.com

排 版 者: 青岛汇英栋梁文化传媒有限公司

印 刷 者: 青岛国彩印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531, 86983437)

开 本: 185 mm×260 mm

印 张: 19.25

字 数: 480 千

版 印 次: 2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5636-5192-4

定 价: 105.00 元

序

该书汇集了齐宁博士多年来在油田开发化学防砂领域精心研究的科研成果,涵盖了采油工程中多方面的内容,诸如防砂、压裂、储层保护等,主要研究了疏松砂岩油气藏开采过程中的出砂与防砂问题。

该书具有如下特点:

一、防砂理论的创新性

该书所介绍的纤维复合防砂技术是针对疏松砂岩油气藏防细粉砂而提出的一项新技术,是建立在“解、稳、固、防、增、保”新的防砂理论基础之上的,具有增产及防止地层出砂的双重效果。在纤维复合防砂研究成果的基础上,衍生出了纤维复合滤砂管防砂技术、疏松砂岩油藏高含水期纤维防砂控水一体化技术、抑水支撑剂防砂技术。纤维复合防砂技术就是将储层改造、储层保护、无筛管化学防砂等技术有机组合而形成的复合型防砂技术,这正体现了技术发展的基本规律。

二、防砂技术的系统性

该书将化学防砂技术的发展依据三条主线进行阐述,不仅从全新的视角审视了整个化学防砂技术的演变轨迹,也将分散的化学防砂技术梳理成了一个整体,有助于读者更深入地把握化学防砂技术的发展脉络。该书内容从疏松砂岩油气藏的地质特征与开发特点到防砂技术的发展演变,从传统的防砂方法到新型的纤维复合防砂技术,从出砂预测及出砂规律研究到防砂方法的选择,从纤维复合体的配方研究到防砂工艺设计,涉及防砂、压裂、储层保护等相关内容,各部分自成体系又相互紧密关联。

三、防砂工艺的实用性

书中介绍的防砂、冲砂技术均来源于科研课题,是为解决油田实际生产问题而提出的,已在生产中取得了良好的应用效果,这种从生产中来,经过研究再回到生产中加以检验的研究方法,不仅促进了生产的发展,也提高了科研水平,开阔了科研视野。

相信该书的出版,对从事油气井防砂的科研技术人员会有所裨益,同时也有助于提高高校相关专业师生们的教学与科研的水平与能力。



前 言

油气井出砂是疏松砂岩油气藏开采的主要矛盾,为了改善这类油气藏的开发效果,防砂技术也在不断发展。化学防砂发展至今,方法越来越多,工艺也日趋完善。近年来防砂的技术发展趋势概括为:① 防砂与储层保护相结合,在防砂的过程中首先要考虑保护储层。② 防砂与储层改造相结合,防砂的同时要考虑到防砂后油气井的产能,不能将砂防住了,油气也不出了,应在防砂的同时尽可能降低对产能的影响或不影响产能,甚至增加油井产能,如结合端部脱砂压裂技术,可实现防砂增产的目的。③ 向无筛管防砂技术发展,以节省成本、方便修井和重复防砂作业。④ 细粉砂处理技术,通过预处理使易动微粒变大,以提高其运移启动生产压差,防止运移微粒对充填体堵塞。总之,防砂技术是从单一型向复合型发展,并由传统的防砂和尽量降低对产能的影响转变为防砂与增加产能相结合。

本书主要总结了作者近年来在疏松砂岩油气藏化学防砂领域的一些研究成果,包括国家自然科学基金(青年)项目“纳米 SiO_2 改性纤维树脂防砂体的力学性能及破坏机理研究”、中国石油化工股份有限公司科技项目“纤维复合无筛管防砂技术”“稠油热采井纤维防砂技术”“水驱油田高含水期控水防砂一体化技术研究”和“纤维复合滤砂管的研究与应用”的研究成果,油田技术服务项目的成果,以及齐宁、周福建博士论文的研究成果。

全书分为上、下两篇,共十一章。上篇主要阐述疏松砂岩油气藏化学防砂原理与设计方法,内容涉及疏松砂岩油气藏化学防砂的国内外技术研究现状与进展,油井、气井、水井的出砂机理及影响因素的差异分析,传统化学防砂工艺及其原理介绍,化学防砂井的产能预测与评价,以及化学防砂工艺设计理论与方法。下篇主要介绍化学防砂工艺新进展,重点介绍纤维复合防砂等新兴技术以及化学防砂工艺的发展前景与展望。

本书的特点是:应用系统工程原理,以油井生产系统为对象,从油层—井筒—井下防砂工具子系统出发,辩证发展地看待油井生产子系统,以防砂技术的发展趋势为主线,阐述化学防砂的基本原理、工艺技术和计算方法。

参与本书研究工作的还有中国石油大学(华东)的曲占庆教授、李宾飞副教授、李松岩副教授、周童讲师,卡尔加里大学的 Shengnan Chen 教授,中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司孤岛采油厂高成元高级工程师,江苏油田分公司试采一厂朱苏青高级工程师。感谢张琪教授、张贵才教授、李明忠教授和葛际江教授对本书研究工作的指导。还有许多其他参与和关心本书的同志,特别是初稿完成后张琪教授亲自主审全书,提出了许多宝贵意

见,作者诸多研究生也为本书的出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心、真诚的感谢。

本书的出版得到了中国石油大学(华东)学术著作出版基金的资助,在多方面的支持下得以顺利出版,在此也感谢学校发展规划处领导的关心和支持。

疏松砂岩油气藏化学防砂领域范围广、内容多,本书仅介绍了作者近年来的研究成果,还有很多他人的成果没能涉及。由于作者水平和经验有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

◇ 上篇 ◇

第一章 绪 论	2
参考文献	5
第二章 疏松砂岩油气藏出砂机理及其因素分析	6
第一节 疏松砂岩油藏油井出砂因素分析	7
第二节 疏松砂岩油藏注水井出砂因素分析	9
第三节 疏松砂岩气藏出砂因素分析	10
第四节 出砂影响因素灰色关联分析方法	13
参考文献	20
第三章 化学防砂工艺及其原理	21
第一节 人工胶结固砂	21
第二节 人工井壁防砂	32
第三节 其他化学固砂方法	41
参考文献	45
第四章 化学防砂井产能预测与评价	46
第一节 高压充填防砂井产能预测	46
第二节 端部脱砂压裂防砂产能预测与评价	53
参考文献	58
第五章 化学防砂工艺设计理论与方法	59
第一节 高压充填防砂工艺设计理论与方法	59
第二节 端部脱砂压裂防砂工艺设计理论与方法	73
参考文献	80

◇ 下篇 ◇

第六章	纤维复合防砂技术	82
第一节	纤维复合体	83
第二节	纤维复合防砂技术及其力学分析	94
第三节	纤维复合防砂井产能预测与评价	116
第四节	纳米 SiO ₂ 改善纤维复合防砂技术	129
第五节	复杂井况下纤维复合防砂技术	157
第六节	纤维复合防砂工艺设计及矿场应用实例	164
参考文献		174
第七章	纤维复合防砂技术集成	177
第一节	纤维复合滤砂管防砂技术	177
第二节	疏松砂岩油藏高含水期控水防砂一体化技术	189
参考文献		199
第八章	抑水支撑剂防砂技术	200
第一节	石英砂抑水处理方法	201
第二节	表面活性剂石英表面的疏水效果评价	204
第三节	OTS 自组装法制备抑水石英砂	217
第四节	抑水石英砂物模研究与评价	226
参考文献		230
第九章	管内人工井壁无筛管防砂技术	232
第一节	可脱离式充填筛管的结构特点与设计	232
第二节	可脱离管体材质优选	236
第三节	可脱离式充填筛管用降解剂及其降解机理研究	239
参考文献		248
第十章	冲砂技术	249
第一节	水力冲砂	249
第二节	泡沫冲砂	265
参考文献		294
第十一章	化学防砂工艺的发展前景与展望	295

上 篇

绪 论

我国疏松砂岩油气藏分布范围广、储量大,产量占有重要的地位,油气井出砂是这类油气藏开采的主要矛盾。一些注水开发的砂岩油气藏在开发初期油气井并不出砂,但随着含水上升,油气井开始出砂,并越来越严重,制约着油气井的正常生产。油气井出砂会引起砂埋油气层或井筒砂堵,造成油气井停产,使地面和井下设备严重磨蚀、砂卡,严重时还会引起井壁坍塌进而损坏套管,这些问题使得后续的冲砂检泵、地面清罐等维修工作量剧增,既提高了采油采气生产成本,又增加了油气田开采难度。

一、出砂地层的分类及特征

根据地层砂胶结强度的大小可以将出砂地层分成三种类型。

1. 流砂地层

流砂是指没有胶结的地层砂,即地层中没有有效的胶结物。流砂地层的聚集依靠很小的流体附着力和周围环境圈闭的压实力。这种地层极易坍塌,使钻具难以顺利通过,根本无法采用裸眼砾石充填完井方法。油气井完井以后,一旦开井投产便立即出砂并连续不断地出砂,甚至会延续几十年。尽管累积出砂量越来越大,但套管周围不会出现地层亏空,只是地层越来越疏松。这种地层的出砂规律是产出液含砂量相对稳定,基本上是一个常数。

流砂地层难以取芯,需研制特殊工具在钻井过程中获取岩样。此外,只能依靠井底捞砂或冲出砂来获得砂样。此类地层在砾石充填作业中,经常发生地层吐砂现象,造成油、气层砂埋,筛管下不到井底、炮眼砂堵、砾石与地层砂互混,甚至地层砂通过筛管缝隙进入筛管内腔卡住冲管造成事故。因此,必须采取特殊的工艺措施来预防这些现象的发生。如使用空心桥塞作井底,这种桥塞也叫沉砂封隔器,以便地层吐出的砂子沉入井底口袋;还可以使用密度较大的工作液并加入适量的稠化剂来阻止地层吐砂;也可以选用高密度挤压砾石充填工艺技术,以便高密度砂浆在炮眼中形成段塞流,把炮眼中的地层砂推出炮眼,在套管周围形成密实的充填区,有利于油气井的正常生产。

2. 部分胶结地层

这种地层含有胶结物数量少,胶结力弱,地层强度低。用常规取芯工具可以取得岩芯,但岩芯非常容易破碎,采取相应的技术措施稳定地层,可以进行裸眼砾石充填完井。如控制

钻井液性能,防止地层坍塌,或在钻井液中加入适量的暂堵剂,防止失水过多而引起地层膨胀造成垮塌。

投产以后,地层砂会在炮眼附近剥落,逐渐发展形成洞穴。这些剥落的地层砂小团块进入井筒极易填满井底口袋,堵塞油管,掩埋油、气层。经过对原油含砂量的检测,发现这类地层的出砂规律是产出液含砂量变化较大,甚至每天都不一样,时多时少。

随着产层压力递减,作用在承载骨架砂粒上的负荷逐渐增加,出砂情况会日趋严重。如果不及早加以控制,那么产层附近的泥岩、页岩夹层也会因空穴加大而剥落,从而造成近井区域泥岩、页岩和砂岩三种剥落物互混,渗透率降低,产量下降。任其发展,有可能造成地层坍塌,盖层下沉,套管损坏,油气井报废的严重后果。

3. 脆性砂地层

脆性砂地层也称易碎砂地层,有较多的胶结物,是中等胶结强度的砂岩。这种地层很容易取芯。从取出的岩芯分析,似乎地层有足够的强度不会出砂。但地层流体产出时,却能在地层面上把地层砂粒冲刷下来。脆性砂地层的出砂规律是开始投产时出砂几天或几周,忽然出砂量大减,几乎是无砂产出,此时产量有可能会上升,但到一定程度后有可能重新出砂。这种规律是因为在出砂过程中套管外部地层冲蚀空穴突然增大,过流面积成倍增加,使地层流体的流速大幅度下降,致使出砂量明显下降。随着油井条件变化,又会形成新的出砂环境而开始出砂。当单位过流面积上的流体速度达到一定数值时,又会出现地层砂大块垮塌,过流面积倍增而停止出砂,进入另一个周期。周而复始任其发展,洞穴越来越大,到一定的程度就有可能形成灾难性的地层坍塌,使油气井套管变形而报废。

此类地层的裸眼砾石充填完井成功率很高。由于裸眼井筒直径大,过流面积大,地层流体流速低,对地层层面的冲蚀力较小。同理,在套管内砾石充填完井时,大直径高密度射孔技术将减少流体对地层层面的冲蚀,有利于油气井防砂。

二、疏松砂岩油气藏防砂技术现状及化学防砂技术前景

近年来,我国经济高速发展,能源的供求矛盾日益突出。为了满足经济发展的需求,各大油气田加大了开发力度。采取大排量强提液措施后近井地带压降增大,会导致油气井暴性水淹。尤其是在泥质含量较高的疏松粉细砂岩油气藏,油气井含水上升后,储层颗粒间原始毛细管力下降,地层强度降低,细粉砂大量产出;另外,含水上升也会导致胶结物被水溶解,特别是黏土矿物,如蒙脱石等,遇水后膨胀、分散,大大降低了地层骨架强度和地层渗透率,使得油气井产能受到极大伤害。

在加大常规油气藏开采力度的同时,也在加大那些出砂严重、防砂难度大、过去难以正常开采的稠油和超稠油油藏的开采力度。这些油藏通常采用注蒸汽(蒸汽吞吐、蒸汽驱)开采。一方面,稠油的高黏度本身就加重出砂;另一方面,蒸汽对岩石颗粒的胶结物产生的溶蚀作用会降低岩石的胶结强度;此外,蒸汽中的气体有着高的线流速度,对岩石颗粒的拉伸破坏作用要高于液体,蒸汽的冲刷作用对岩石产生了巨大的、持续的拉伸破坏;同时,注蒸汽时的高压差会对岩石造成剪切破坏,使近井地带的岩石发生形变。上述种种影响将会加重出砂。

对于低温粉细砂岩油气藏的开发,由于化学防砂技术对温度敏感,低温下胶结强度极低,不能形成有效的挡砂屏障,防砂效果极差,因此常下入机械管具或采用筛管加砾石充填

等技术进行防砂,但防细粉砂效果并不理想。

目前国内外油气井防砂主要采用管内绕丝筛管砾石充填,其次是预充填绕丝筛管、树脂胶结、涂层预包砂充填等工艺技术。对于疏松砂岩油气藏,目前主要采用绕丝筛管砾石充填、双层预充填绕丝筛管防砂工艺,它们对于砂粒粒度中值相对较粗、分选性较好的地层,防砂效果比较理想;对于砂粒粒径较细的地层,树脂砂浆人工井壁化学防砂工艺取得了不同程度的防砂效果。然而传统的防砂技术,如目前常用的砾石充填防砂工艺,为了保证防砂效果,通常与砾石充填筛管配合使用,即使是压裂充填防砂工艺,也需与砾石充填筛管配合使用,才能达到较好的防砂效果,这样就增加了流体流入井筒的附加阻力,影响了防砂后的油气井产能,降低了经济效益。此外,传统防砂技术对储层也有一定的损害。

目前随着油气田开采的不断进行,油气层的地质状况越来越恶劣,使得砂害日益加重,正因为如此,也迫使防砂方法有了迅速的发展。国内外各油气田依据本油气田的地质特征,提出并使用了各种新型的防砂工艺与技术,如整体烧结金属纤维筛管防砂技术、金属纤维防砂管防砂技术、酸化砾石充填复合防砂技术、压裂砾石充填复合防砂技术等。从以上技术可以看出,国外防砂正从传统的单一防砂技术向新型的复合防砂技术发展,这是防砂技术的第一个发展趋势。单一的防砂技术并不能很好地适用于各种出砂地层,而复合防砂技术集机械与化学防砂技术优点于一体,可以与端部脱砂压裂工艺结合使用,具有增产与防止地层出砂的双重效果,弥补了传统防砂技术的缺陷。这正展示了防砂技术的第二个发展趋势——由传统的防止出砂和尽量降低对产能的影响转变为防砂与增加产能相结合。

出砂严重时易引起井壁坍塌而损坏套管,致使套变井、套损井大量出现。对于套变井防砂,机械防砂管具因其无法下入到预定的位置而导致防砂效果较差,而化学防砂因其防砂的同时无须在井筒留有工具,尤其适合于套变井防砂。这也说明了防砂技术的第三个发展趋势——从井筒留有防砂管具向无筛管防砂转变。

尽管机械防砂的应用推广程度要高于化学防砂,但化学防砂因其独特的性能,在防砂技术市场中仍占有较大的比重。化学防砂既是适用于套变井防砂的专有技术,也可以与端部脱砂压裂工艺结合使用,以达到增产与防砂的双重效果,这正与防砂技术的三个发展趋势相吻合。

油、气井防砂方法很多,最终要以防砂后的经济效果来选择和评价。有的油井出砂量不大,可以采取防止井底积砂法带砂采油。如选用管式泵抽油、小直径油管、循环注液或气举来加速井筒中液流上升速度,从而把地层砂带出井筒。这些方法并不能把地层砂限制在地层内部,因此严格来讲不能算作防砂方法,只是一类采油技术。

根据防砂原理,防砂方法大致可以分成砂拱防砂、机械防砂、化学防砂和热力焦化防砂四大类。化学防砂在 20 世纪 60 年代开始研究应用,很快形成规模,发展了酚醛树脂溶液地下合成、水带干灰砂等多种工艺,成为当时的主要防砂方法。随着油田深入开发,20 世纪 70 年代开始了机械防砂的研究,首先研制成功了环氧树脂滤砂管并广泛应用,取得了良好效果。进入 20 世纪 80 年代,在学习国外技术的基础上,又研究发展了以金属绕丝筛管砾石充填为主导的机械防砂技术。该技术具有强度高、适应性强、防砂成功率高等优点,得到了迅猛发展,目前各相关技术基本配套,成为重要的防砂手段,展示了广阔的发展前景。

化学防砂在疏松砂岩油气藏的开发过程中占据着举足轻重的地位。化学防砂发展至今,方法越来越丰富,工艺也日趋完善。化学防砂大致可分三类:第一类是树脂胶结地层砂。

既可以用成品树脂注入地层,也可以在地层中合成树脂来胶结地层砂。第二类是人工井壁。人工井壁种类很多,如预涂层砾石、树脂砂浆、水带干灰砂、水泥砂浆、乳化水泥、树脂核桃壳等。这些人工井壁材料都要通过管柱泵送到产层,并挤入套管以外的空穴中去,形成密实充填,使地层恢复或部分恢复原始应力。待这些充填材料凝固,形成具有一定强度的挡砂屏障后,再把井筒中多余的充填物钻铣掉,使油、气井具备开井生产条件。第三类是其他化学固砂法。这一类方法制约条件较多,使用不广泛,主要有以下几种:焊接玻璃固砂法、氢氧化钙固砂法、四氯化硅固砂法、水泥-碳酸钙混合液固砂法、聚乙烯固砂法和氧化有机化合物固砂法。

化学防砂由于对地层渗透率有一定的伤害作用,且成功率不如机械防砂,尤其是不适用于多油层长井段防砂,同时还存在化学剂有效期短、老化失效的现象,成本相对较高,应用程度不如机械防砂广泛。

但化学防砂也有着机械防砂无法比拟的优势,例如化学防砂适用于防细粉砂以及高泥质含量储层和渗透率相对均匀的薄层段,还适用于双层完井作业中的上部地层防砂,尤其适用于无法下入机械防砂管具的套变井防砂,防砂施工后井底不留工具,便于后续措施的开展。并且随着化学防砂工艺技术的不断发展,化学防砂不断突破自身的技术壁垒,日益在多油层长井段防砂领域大放异彩。2007年11月13日,中国石油大学(华东)在单家寺油田一口稠油热采井(SJ56-8-18井)上首次采用纤维复合防砂技术,取得了优异的防砂效果,目前该井防砂后已进入第四个注汽周期,截至2011年底已累计生产了1508 d,仍未见出砂现象。而该井泥质含量为14.036%,射孔厚度高达17.8 m,已远远超过化学防砂的传统适用界限(小于3 m)。目前,中国石油大学(华东)已将这种以化学防砂为核心的纤维复合防砂技术应用到了油水井、注聚井、稠油热采井、套变井、大排量强提液井等复杂条件下的防细粉砂作业,取得了良好的防砂效果。

目前,各主要疏松砂岩油田都已进入高含水期开发,油田为了稳产,提液强度日趋增大,地层因出砂亏空严重,套变井逐年增多,单一的井筒内挡砂工艺已很难满足这些井的防砂需求,必须把防砂当成一个系统工程来对待,许多油田先后实施了“疏通液流通道,远稳近固,建立了多级挡砂屏障”的复合防砂治本措施,即在稳定地层骨架基础上的防砂措施。这项措施的实施,不仅延长了出砂井的寿命,也降低了年套损报废井的数量,大大提高了疏松砂岩油田的经济运行质量和效益。

笔者认为,任何一项技术都不是“包治百病”的,都有其自身的适用范围与技术界限,化学防砂、机械防砂、复合防砂等各项防砂技术缺一不可,互为补充。随着石油工作者们对于化学防砂理论和技术的不断创新,势必会使化学防砂工艺技术体系越来越完善,也必将会迎来化学防砂日渐广阔的应用前景和蓬勃发展的一个又一个春天。

参考文献

- [1] 万仁溥,罗英俊.采油技术手册(第七分册 防砂技术).北京:石油工业出版社,1991.
- [2] 齐宁.疏松砂岩油藏防砂增产一体化技术研究.东营:中国石油大学(华东),2007.

疏松砂岩油气藏出砂机理及其因素分析

油气井出砂通常是近井地带的岩层结构遭受破坏引起的,其中,弱固结或中等胶结砂岩油气层的出砂现象较为严重。由于这类岩石胶结性差,强度低,一般在较大的生产压差下井底周围地层容易发生破坏而出砂。油气井出砂与油藏深度、压力、流速、地层胶结状况、压缩率和自然渗透率、流体种类和相态(油、气、水的情况)、地层性质等有直接的关系。从力学角度分析,油气层出砂可分为剪切破坏和拉伸破坏。前者是炮孔周围应力作用的结果,与过低的井底压力和过大的生产压差有关;后者则是开采过程中流体作用于炮孔周围地层颗粒上的拖曳力所致,与过高的开采速度或过大的流体速度有关。二者相互作用,相互影响。除上述两个机理外,还有微粒运移出砂机理,包括地层中黏土颗粒的运移,因为这会导致井底周围储层渗透率的降低,从而增大流体的拖曳力,并可能诱发固相颗粒的产出。

影响地层出砂的因素大体划分为两大类,即地质因素和开采因素。第一类因素是指储层地质条件和油藏流体性质(包括构造应力、沉积相、岩石颗粒大小及形状、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,当然在开发过程中出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;第二类因素主要是指开采过程中所采取的各种措施对出砂可能带来的影响,它们很多可以人为控制,包括油层压力和生产压差、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、完井方式、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。

对油井来说,入井流体黏度较气体大得多,对油层微粒的冲刷作用大,但流体流速较气井低。对疏松砂岩气藏而言,气井的高流速是这类气藏出砂的主要因素,油井出砂主要是黏滞拖曳力,而气井出砂主要是产出气与砂粒碰撞发生动量交换,携带砂子运移出砂,因此气体的密度是很关键的参数。此外,含水上升对出砂也有较大的影响。

国内疏松砂岩油藏主要以孤岛等油田为典型代表,疏松砂岩气藏主要以青海涩北气田为典型代表。本章就以孤岛油田和涩北气田为例,在对其储层出砂机理与出砂影响因素调研分析的前提下,使用物理模型和数学方法研究影响两类典型油田出砂的因素及其规律。

第一节 疏松砂岩油藏油井出砂因素分析

孤岛油田位于济阳坳陷沾化凹陷东部孤岛潜山构造带上,是一个以披覆背斜构造为主的复式油气田,埋藏深度 1 120~1 350 m,含油面积 85.2 km²,地质储量 38 578×10⁴ t。孤岛油田主要目的层自下而上为新生界古近系的沙河街组、东营组,新近系的馆陶组、明化镇组油气层,主力含油层系为馆陶组上段油层。馆陶组上段储层厚,物性好,埋藏浅,压实较差,胶结疏松,粒度中值及渗透率总的变化趋势是自上而下增大。平均粒度中值为 0.117~0.201 mm,平均孔隙度为 32%~35%,平均渗透率为(1 264~3 370)×10⁻³ μm²,平均含油饱和度为 60%~69%。

一、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,井壁附近就总是存在一个塑性变形地带,在一定条件下塑性带处于稳定状态。但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),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了相似的规律。

2. 颗粒胶结性质的影响

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、胶结物种类及数量、胶结方式、颗粒尺寸及形状密切相关。表示胶结程度的物理量是地层岩石强度。一般来说,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,而以泥质胶结为主的砂岩较疏松,强度较低(并且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,其他如孔隙-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(其他条件相同时),反之,粗的分选好的圆颗粒则表现为弱胶结。

孤岛油田主力含油层系为第三系中新统馆陶组上段油层,为一套河流相砂体沉积,具有时代新、埋藏浅、成岩性差的特点。储层具有渗透率高、胶结疏松、非均质性强、强亲水的特点。砂岩为长石砂岩或岩屑长石砂岩,矿物成熟度低。颗粒磨圆度以次棱角状为主,其次为次圆状。胶结物以泥质为主,泥质含量为 9%~12%。砂岩粒度中值为 0.117~0.201 mm,平均为 0.136 mm,分选系数为 1.56~1.71。主要胶结类型为接触式、孔隙-接触式和接触-孔隙式,其地质特征决定了油层易出砂的特性。

3. 流体性质的影响

孤岛油田地面原油相对密度为 0.935~0.990,平均为 0.962 5,地面黏度为 250~5 700 mPa·s,平均为 2 195 mPa·s,地下原油相对密度为 0.871~0.925,地下黏度为 20~

130 mPa·s, 平均为65 mPa·s, 饱和压力为7.2~11.5 MPa, 地饱压差为1.5~3.0 MPa, Ng^{1+2} 地层水总矿化度为2 797 mg/L, 氯离子含量为1 500 mg/L, 水型为 NaHCO_3 型。由此可见原油性质较差, 为高密度、低含蜡、低凝固点的沥青基石油, 生产时施加在岩石颗粒上的拖曳力大, 易造成出砂。

二、开采因素

开采因素主要包括地层压降及生产压差对出砂的影响、流速对出砂的影响、含水上升或注水对出砂的影响、地层伤害的影响等, 这将在气井出砂因素分析中加以详细对比阐述。这里仅重点说明影响油井出砂的完井因素。完井几何形状因素包括井眼尺寸、井斜、射孔条件(方位、相位角、布孔格式和孔密、孔径等), 它们与油层相连, 组成了油流通道, 对出砂势必产生一定的影响。

首先, 井眼尺寸对出砂不会产生太大的影响, 因井径的变化不会使油流阻力发生根本的变化。

1. 射孔孔道充填物的影响

弹孔孔道充填物渗透率是决定弹孔压降的关键因素, 其渗透率高则压降就小, 弹孔畅通无阻则阻力最小。

地层经过射孔后, 由于枪弹碎片、碎屑、地层微粒不可能完全从弹孔中清除, 对弹孔总有局部堵塞, 会增加流动阻力。而弹孔压降是生产压差的最主要的组成部分(约占80%), 因而采取一切有效措施来消除弹孔堵塞是十分必要的, 如弹孔清洗工艺、反冲洗工艺、负压射孔工艺等。只有弹孔畅通, 才有利于减缓出砂(假如油井不采取防砂措施)。如果采取防砂措施, 疏通弹孔也同样重要, 因为可以向弹孔内挤入渗透率极高的充填材料, 甚至为地层内预充填提供更多的空间和畅通的流道。

2. 射孔参数的影响

弹孔流道面积直接影响弹孔压降, 对每个弹孔而言就是要提高孔径, 而对整个井段而言就是要增加孔密。增大孔径、提高孔密的综合效果是提高有效流动面积, 从而降低流动阻力, 也降低流速, 即在其他条件不变时降低生产压差, 有利于减缓出砂。即使要采取防砂措施, 高孔密、大孔径射孔也有利于减少因防砂而带来的产量损失。但是射孔密度过大可能会导致套管破裂和砂岩油层结构遭到破坏。

井斜的影响: 当井斜角小于 45° 时, 仍可把它当作垂直井, 不会对出砂产生重大影响; 当井斜角大于 45° 时(高倾角斜井, 甚至水平井), 由于与油层段接触面积大大增加, 在保持相同产量的条件下, 出砂减缓。

射孔相位角的影响: 研究表明 90° 时最好, 软件优化计算发现此时产能比最高, 这是由于地层流线以井轴为中心, 相对对称, 减少了流线的弯曲和收缩, 阻力最低, 有利于减少出砂。另外, 螺旋布孔格式的目的是减少因射孔带来的套管强度下降。对于高倾角斜井和水平井, 为减缓出砂, 要求在 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 相位角范围内射孔, 可减少套管上方油层出砂的可能性。

弹孔穿透深度的影响: 只需要突破钻井液伤害半径即可, 因为疏松砂岩地层为高渗透层, 没有深穿透的必要, 而且过分追求孔深还会增加射孔成本费用。

三、其他因素

目前国内各大主力油田随着油田滚动扩边和深入挖潜的进行, 如孤岛油田南区东扩边

区 Ng³ 和 Ng¹⁺² 及垦东 32 块 Ng⁵ 和 Ng⁶ 等区块,油藏品位越来越低,油井出砂越来越严重,主要是粉细砂颗粒及黏土矿物运移膨胀;同时,在聚合物区,聚合物溶液向油井推进过程中,其更强的携砂能力进一步加剧了油层出砂。

第二节 疏松砂岩油藏注水井出砂因素分析

注水井出砂是困扰疏松砂岩油田注水问题的主要因素之一,在注水过程中频繁关、停、洗井等都有可能导致地层出砂。出砂会导致砂卡管柱无法起出,造成大修甚至报废。以中原油田为例,仅 2012 年就有 220 口注水井出砂,占有出砂井的 31%。

通过从地层、工艺技术及生产运行管理等方面的分析,找出了注水井返吐出砂的主要原因,主要有以下几个方面。

一、地质因素

以赵 108 断块为例来分析地质因素对水井出砂的影响。

华北地区是我国中强构造应力区,在不同深度处岩层的岩性、产状和力学性质存在较大差别,使得在同一区域应力场作用下具有不同的应力值。尤其是在断层附近或构造部位,中强的构造应力局部破坏了原有的内部骨架,使这些部位的地层强度相对较弱,是易出砂的部位。

赵 108 断块位于晋州市凹陷赵县西塌陷背斜核部,受两条北东向断层夹持,是以构造控制为主的岩性构造油藏。主要含油层系为 Es₂₊₃,埋深为 1 622.8~1 796 m,含油面积为 1.4 km²,石油地质储量为 300.17×10⁴ t。储层平均孔隙度为 25%,平均有效渗透率为 424×10⁻³ μm²,主要沉积类型为水下分流河道和河口砂坝沉积,油层横向分布稳定,三口井以上的油层连通率为 92%,平均单井油层厚度为 15.9 m,储层非均质性严重。目前该断块仅打开Ⅱ和Ⅲ油组,Ⅰ油组作为后备层待挖潜。动用的地质储量约为整个油藏地质储量的 91.1%,注采关系完善。

赵 108 断块储层胶结类型为孔隙式胶结,胶结物以泥质—高岭石胶结为主。地层颗粒分选性普遍较差,主要是以次圆—次棱角状为主的砾质不等粒砂岩。注水过程中,由于胶结物被水溶解,特别是一些黏土矿物,如蒙脱石等遇水后膨胀、分散,大大降低了地层强度。高岭石在水作用下易分散,并在液流作用下运移堵塞地层孔道,注水对地层的冲刷作用导致地层强度降低。这也是疏松砂岩油藏水井出砂的主要原因之一。

通过表 2-1 中历次作业情况统计可知,注水井的出砂还是较为严重的,特别是赵 41-18 井,平均半年一次冲砂作业,基本上是砂埋油层,累计出砂 12 m³,大大增加了作业工作量,严重影响了注水井的正常生产。

表 2-1 赵 108 断块水井历次作业情况统计表

井 号	井段/m	统计时间	作业内容	次 数	累积出砂量/m ³	其他措施
赵 41-18	1 732.0~1 796.0	2002-07—2007-04	冲 砂	13	12	调 剖
赵 41-6x	1 678.5~1 715.0	1999-03—2007-04	冲 砂	11	8.5	调 剖
赵 41-1	1 721.4~1 827.4	1997-07—2007-04	冲 砂	6	3.4	调 剖