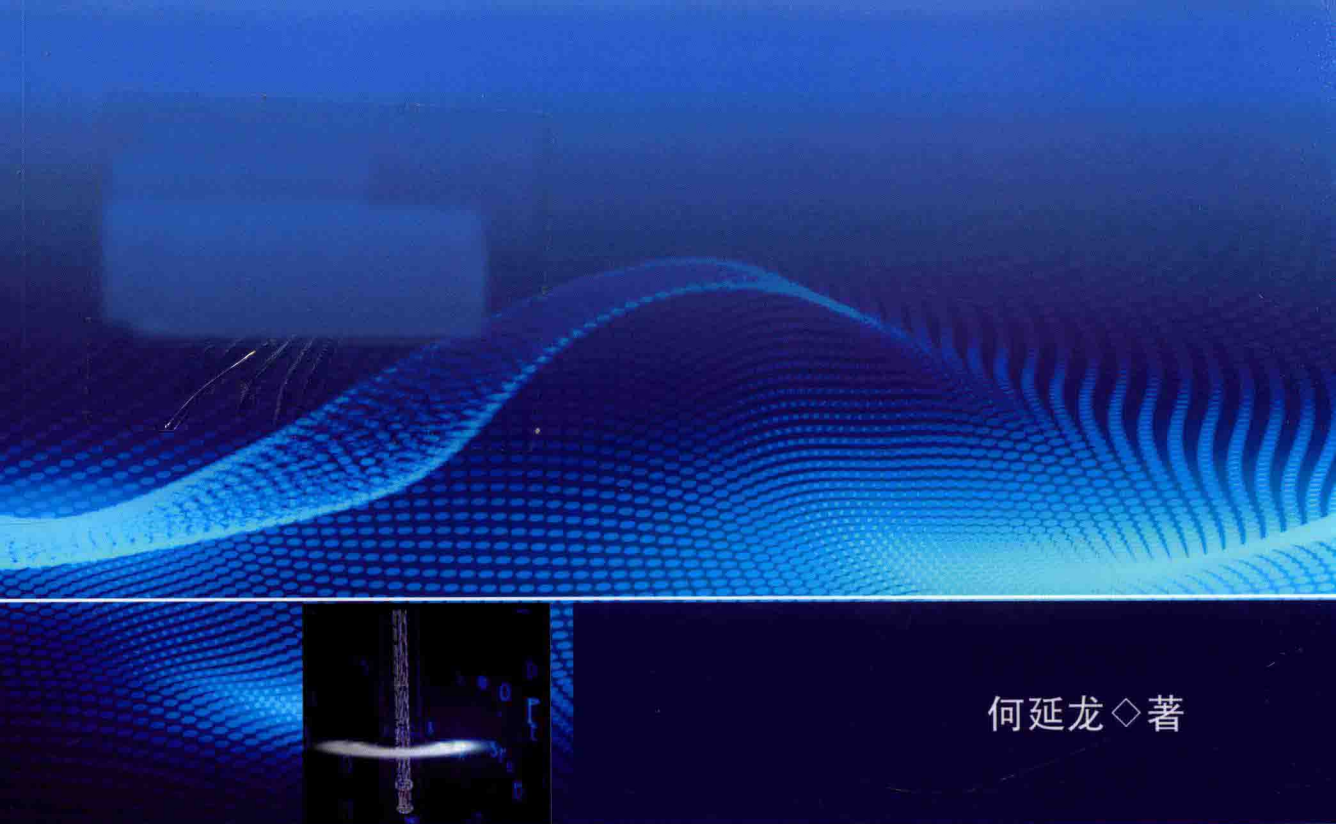




何延龙◇著

水力脉冲波协同解堵技术 理论与应用



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

水力脉冲波协同解堵技术 理论与应用

何延龙 著

中国石化出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水力脉冲波协同解堵技术理论与应用 / 何延龙著.

—北京: 中国石化出版社, 2018. 7

ISBN 978-7-5114-4953-5

I. ①水… II. ①何… III. ①石油开采-水力振动-水动力学-研究 IV. ①TE357.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 156603 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

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 10.75 印张 229 千字

2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

定价: 52.00 元

前言

由于油藏本身流体及储层岩石矿物组成特点的不同,在注水、注汽等一系列开发过程中,由于储层温度、压力以及储层流体性质和注入流体性质的变化极易引起不同类型的储层伤害。针对发育较差且敏感性强的储层,高温、高压、碱性、酸性、矿化度差异较大的流体在注入过程中很可能会使得各类岩石矿物发生溶解、膨胀与转化等,同时储层孔隙中的颗粒在流体的作用下会发生沉积、运移甚至堵塞;同时,由于开发过程中地层温度和压力的变化容易引发储层中沥青质、胶质、石蜡等有机物沉积,沉积的重质组分极易与储层中的岩石矿物发生吸附,形成有机堵塞,沥青质的吸附还可能导致岩石发生润湿性反转,储层受到伤害,从而使油藏流体在储层中的渗流阻力增大,这些不同种类的储层伤害会使储层渗透率和孔隙度下降,从而导致注水、注汽困难。

针对常见的堵塞类型(无机堵塞物和有机堵塞物),所采取的降压增注措施较为广泛,包含注黏土稳定剂、泡沫酸洗、复合酸化、声波助排、混排气举、压裂地填、注稠油降黏剂和薄膜扩展剂等。水力脉冲波解堵技术是一种物理法解堵技术,其穿透作用距离大,在水力脉冲波作用下储层中的流体和堵塞颗粒发生快速往复振动,堵塞物脱离储层孔道表面;当污染物及时排出后,油层渗透性明显提高,该解堵技术曾成功应用于污染储层的解堵过程中。目前,应用于油水井近井地带的解堵具有很好的效果,同时具有简单、易行、投入少、见效快且不会给油田带来新的污染等优点。水力脉冲波协同化学解堵剂复合增产技术是将振源产生的水力脉冲波与化学增产措施相结合,进行复杂油气田开发的一种新型复合增产技术。脉冲作用可以使井壁周围或炮眼附近堵塞物不能形成或抑制其形成,是一种“动态解堵”工程。将大功率的脉冲波与化学解堵剂有机结合,不仅可以提高化学作用效果,而且可以延长化学作用距离,既有利于渗流,又减少或抑制了堵塞物的二次形成。因此,采用水力脉冲波协同解堵增产技术,可以有效地清洗炮眼,解除近井地带堵塞,复合作用远远好于单独作用的效果,使增产措施的作用效果得到大幅度提高。

本书以波动力学、弹性力学、渗流力学、分形几何学、化学反应动力学等多学科理论为基础,系统介绍了水力脉冲波发生器设计及性能优化(第二章)、水力脉冲波发生器动力学特征(第三章)、水力脉冲波实验装置及实验方法(第四章)、水力脉冲波对

颗粒的微观解堵动力学(第五章)、水力脉冲波协同酸化岩矿溶蚀动力学(第六章)、水力脉冲波协同酸化动力学(第七章)和水力脉冲波协同解吸剂沥青质解堵动力学(第八章);并基于室内研究成果,对水力脉冲波协同化学解堵技术现场应用情况(第九章)进行了介绍。

本书由“西安石油大学优秀学术著作出版基金”和“陕西省自然科学基金研究计划——一般项目(青年)(编号:2018JQ5208)”资助出版,所涉及的内容主要来自于作者及所在研究团队成员的研究成果,部分内容参考了近年来国内外同行、专家在这一领域公开出版或发表的相关研究成果;同时,本书得到西安石油大学石油工程学院、教务处、科技处以及中国石化出版社的大力支持;另外,石油工程学院的各位前辈和同仁也对本书的编写提出了宝贵的意见和建议,在此一并致以诚挚的谢意。

本书在撰写和取材上理论联系实际,实用性较强,可供从事油气田开发的工程技术人员、研究人员参考,由于水力脉冲波协同解堵技术所涉及的学科较多,在理论和应用方面尚存在许多问题需进一步探讨和完善,加之作者水平有限,欠妥之处在所难免,敬请读者不吝指正,使之不断完善。

本书在撰写和取材上理论联系实际,实用性较强,可供从事油气田开发的工程技术人员、研究人员参考,由于水力脉冲波协同解堵技术所涉及的学科较多,在理论和应用方面尚存在许多问题需进一步探讨和完善,加之作者水平有限,欠妥之处在所难免,敬请读者不吝指正,使之不断完善。

目 录

第一章 概述	1
第一节 水力脉冲波处理油层技术研究现状	1
第二节 水力脉冲技术作用机理研究现状	3
第三节 化学解堵动力学研究现状	4
第四节 水力脉冲波协同化学解堵技术应用现状	6
第二章 水力脉冲波发生器设计及性能优化	7
第一节 水力脉冲波发生器设计	7
第二节 水力脉冲波发生器性能优化	13
第三节 水力脉冲波发生器现场测试	17
第四节 本章小结	18
第三章 水力脉冲波发生器动力学特征	19
第一节 水力脉冲波发生器动力学模型	19
第二节 水力脉冲波发生器串联体系动力学特征	33
第三节 水力脉冲波作用下地层压力波传播动力学特征	41
第四节 本章小结	44
第四章 水力脉冲波实验装置及实验方法	45
第一节 水力脉冲波室内实验装置	45
第二节 水力脉冲波对岩心渗流特性的影响	47
第三节 水力脉冲波对流体注入性能的影响	50
第四节 本章小结	54
第五章 水力脉冲波对颗粒的微观解堵动力学	55
第一节 水力脉冲波传播动力学研究	55
第二节 水力脉冲波地层颗粒解堵微观动力学研究	58
第三节 本章小结	65

第六章	水力脉冲波协同酸化岩矿溶蚀动力学	66
第一节	水力脉冲波条件下酸岩反应主控影响因素	66
第二节	水力脉冲波协同作用下岩矿颗粒酸化表面分形特征	82
第三节	水力脉冲波协同作用下酸岩反应溶蚀动力学机理	86
第四节	本章小结	91
第七章	水力脉冲波协同酸化动力学	93
第一节	水力脉冲波协同盐酸酸化动力学模型	93
第二节	水力脉冲波协同多氢酸酸化动力学模型	108
第三节	本章小结	126
第八章	水力脉冲波协同解吸剂沥青质解堵动力学	127
第一节	水力脉冲波协同作用下的沥青质解堵参数优化	127
第二节	水力脉冲波协同作用下沥青质吸附-解吸动力学研究	133
第三节	水力脉冲波对解吸剂动态扩散性能的影响	144
第四节	本章小结	145
第九章	水力脉冲波协同化学解堵技术现场应用	147
第一节	现场施工设计	147
第二节	现场施工与效果评价	149
第三节	本章小结	157
参考文献		158

第一章 概 述

目前,可应用的物理法采油技术已越来越多,并且在现场取得了较好的应用效果,如高能气体压裂法、水力振荡和机械振荡增产技术、井下超声波增产技术、井下脉冲放电增产技术(低频)等技术。但是,鉴于采油技术自身的特点以及措施井内的具体情况,这些方法在现场中的应用也存在一定的局限性,均有一定的适用范围。例如:高能气体压裂法适合于脆性且泥质含量少的地层,最适合于灰岩地层,且要求井的强度足够大;水力振荡增产技术主要用于注水井,可处理半径较小的地层,能够清除固体颗粒物等的堵塞;井下超声波增产技术不易处理气油比较高的油层,井上要有电源;井下脉冲放电增产技术在地层胶结好、孔隙度小、渗透率大、原油黏度小的条件下应用效果更好。水力脉冲解堵技术有利于流体在岩石孔隙中的流动,可避免或降低沉积物再次形成,保证化学处理方法获得最佳的效果,延长其有效作用时间;在二者协同效应的作用下,水力脉冲-化学复合解堵技术的应用效果远远好于水力脉冲波解堵或化学解堵技术单独作用时的效果。

第一节 水力脉冲波处理油层技术研究现状

物理法采油技术起源于 20 世纪 50 年代,目前已趋于成熟并形成了一定的生产能力,常见的物理法采油技术包括超声波采油技术、水力振荡采油技术、水力冲击处理油层技术、水力脉冲振动解堵技术、自激波动技术、低频谐振波强化开采技术等。水力脉冲波解堵技术主要用于解除在油水井近井地带的堵塞,其中包括钻井泥浆、机械杂质和沥青胶质沉积等。该项成果具有简单易行、经济效益高且不会对储层造成污染等其他化学解堵方法所不具有的优点。

前苏联的石油工作者曾将水力脉冲技术作为一种有效处理油水井近井地带,且应用最为广泛的技术之一,其中自 1957 年就开始致力于关于水力振动对地层模型作用的科研工作,并初步认识了水力脉冲波对地层的作用机理及相关特性,并在低渗透油田的低产、低能井区首次成功应用了水力脉冲波振动技术,矿场试验表明,该项技术处理油水井近井地带效果显著。1967 年,前苏联首次将低频波弹性振动处理近井地带技术应用于现场试验,处理了近 5000 余口油水井,原油增产超过 $500 \times 10^4 \text{t}$,配注量增加超过 $150 \times 10^4 \text{m}^3$,平均有效期在一年以上。1977 年,前苏联的研究者们对声波处理井底地带的工艺进行研究和试验,研究结果表明,声波作用于地层,在地层中产生了声场和热场,有效作用范围内的地层受到了双重辐射作用,所产生的热量足以使沉积的石蜡-胶质等发生溶解。20 世纪 90 年代后,前苏联的水力振动采油技术已逐步发展为广泛应用的处理油水井近井地带的有效方法,且随着科学技术的发展,水力振动器的振动强度(越来越大)与频率(越来越低)范围在逐渐扩展、改善,同时与自动化技术以及酸化、水力压裂等强化增产措施进行复合应

用,进一步加强了该项技术的近井地带处理作用效果。目前,俄罗斯研究并设计了频率范围为 50~500Hz,压力峰值高达 20MPa 的井下射流泵。阿塞拜疆等国家的油井现场作业统计资料表明,1967~1982 年期间,应用水力脉冲波振动法的油井取得了较好的经济效益,原油增产超过 $280 \times 10^4 \text{t}$,配注量增加超过 $2200 \times 10^4 \text{m}^3$ 。1982 年以来,在乌克兰的各油田成功地试验了水力射流泵处理油层的新技术,处理成功率高达 80% 以上,注水能力提高一倍左右,产量提高 0.5 倍以上。

美国的 Bodine 等于 1948~1989 年进行了大量的有关振动采油机理及设备的研究与设计,由加利福尼亚大学伯克利分校联合的多家科研院所研究了不同低频波动的频率对岩心的影响规律,并在加州的 Center Valley 成功进行了矿场先导性实验;同时,将井下压力波技术应用于 Wellinton 油田的一口井,开展了长达六个月的现场试验,结果发现这口井附近的 8 口油井生产状况均有所改善,其中一口油井的日产量由 10m^3 提高到 13.5m^3 。加拿大的相关研究学者则主要开展了振动采油在稠油开采方面的研究工作,其中包括阿尔伯塔大学的 Spanos 教授等和滑铁卢大学的 Dusseault 教授等都做了大量的深入研究工作,并于 1997 年开展了针对稠油油藏的压力脉冲技术的相关实验,一年后与 PE-TECH 公司合作,开展了矿场的单井试验并进行了全油田范围内的推广应用。

水力脉冲解堵技术在国内的起步相对较晚,但其先后成功应用于吉林、大庆、辽河、胜利、长庆等多个油田,经济有效率高达 85% 以上。水力脉冲解堵技术具有作业简便、易行,经济效益显著,不会对储层造成新伤害,现场适应性强等优点。1990 年,大港油田和中国石油大学成功合作进行了水力脉冲解堵的相关研究,并在枣园油田的枣南作业区块针对其中的 6 口注水井开展了水力脉冲解堵试验,成功率达 100%。1991 年,吉林油田在国外研究成果的基础上提出了一种新的水力振动增产技术。1994 年以来,西安石油大学的蒲春生等开展了一系列针对水力脉冲波原理及设备的研究和设计,先后研究了三代水力脉冲发生器,并在长庆、青海和胜利等多个油田得到了成功应用。2000 年,中国石油大学(华东)与大港油田联合研发了一种新型的水力振荡解堵器,并将无源流体连续振荡技术成功地应用于油水井近井地带的解堵过程。2001 年,张人雄等研究了采用低频脉冲声波技术处理岩心的作用效果,说明低频声波具有造缝,增加孔喉连通性能,清除地层堵塞物等作用。2003 年,张建国等通过对前期研究成果的优化,设计出一种可以实现低频率振动的水力振动器,增强了低频水力振动器矿场应用的可靠有效性,解堵效果较为显著。2002 年,胜利油田将水力脉冲解堵技术应用于防砂井的解堵作业中,矿场应用效果表明小直径的振荡器不但具有解除油水井近井地带堵塞、污染等的能力,而且还能够避免化学解堵法造成的地层污染及其对油套管的损害,同时在孤东采油厂开展了共计 12 个井次的注汽高压井水力振动解堵的降压增注矿场试验,有效率达 100%,平均注汽压力下降 2MPa,累计增油 1000t 以上,该技术实施后降压和注汽效果得到极大地改善,表明水力脉冲解堵降压工艺具有对稠油注汽高压井的适用性和有效性。2006 年,梁春等针对吉林油田储层开发特征及主要的堵塞物类型,提出了一种新型水力振动解堵油层技术,主要依靠水力振动作用解除近井带的油层孔道堵塞,以实现油井的增产。2010 年,大庆油田针对污染井的近井地带实施了低频声波振动采油增产措施,矿场试验应用 20 余口井,累计增油量 1500t。

第二节 水力脉冲技术作用机理研究现状

水力脉冲技术主要是利用脉冲水流对储层中的各类堵塞物进行解堵的工艺技术, 其主要的增产作用表现在以下几个方面:

(1) 提高了不同压力梯度条件下多孔介质中流体的流动速度。

(2) 克服毛管阻力, 解除了井眼周围的孔隙堵塞物。

(3) 与多种解堵剂相结合, 在进行高振幅干扰的同时, 不断向井内注入解堵工作液体。

(4) 通过高速剪切的内、外交替脉冲流动, 有利于增大外界注入的流体与油藏本身流体的混合速率, 加强了外界注入流体和油藏储层岩石间的相互作用, 从而使储层堵塞物更容易从岩石表面剥蚀下来, 然后被处理液溶蚀或溶解。

(5) 通过多孔介质传播的膨胀波受到脉冲干扰的作用不断进行叠加, 孔隙中的流体受到叠加波的作用, 其有效流速和作用范围均增加, 相应地增大了注入速度和波及体积, 有利于提高采收率。

(6) 在水力脉冲交变作用力条件下, 工作液易出现“水击”现象, 使得孔隙及岩石壁面上的沉积物较易被剥蚀下来。

近些年来, 国内学者在水力脉冲波传播机理方面取得了一些研究进展。王瑞飞等相关实验对低频水力脉冲波在岩心中的时域、频域及振幅分析, 得到了水力脉冲波在岩心中的传播规律, 基于此规律推导了相关参数的数学函数关系式, 最终建立了低频水力脉冲波在地层中传播的衰减预测模型。贺如等建立了基于液-固耦合等因素的低频水力脉冲波在地层中传播的数学模型, 以及得到了在低频水力振动处于小振幅的前提条件下, 其振幅的衰减幅度和速度与振动频率、储层渗透率、流体黏度及振源振幅的变化关系。张荣军等建立了基于流体动力学等理论的地层、流体和振动参数之间的耦合模型, 得出了在可压缩地层中微可压缩单相流体的平面一维及平面径向渗流方程的解析解, 振动效果和各参数之间的关系, 采用边界条件下的拟稳态平面产能公式计算了平均油井产量, 计算结果和油田现场的相关数据基本吻合。

20 世纪 90 年代, 刘洪军等认为, 水力脉冲波是流体运动中的“水击”现象, 水击压力直接作用在岩石上, 可使岩石发生破碎, 产生不同的微裂缝; 同时, 脉冲压力波在储层中传递, 不断地使孔隙壁面与孔隙内的液体之间进行交变扰动和脉冲剪切, 改变了液体的流变特性, 达到对储层内液体的降黏效果。液体在水力冲击的作用下发生快速扰动, 有效地冲击孔道壁面上的堵塞物。储层孔隙通道在水力脉冲波作用下得以畅通, 从而达到解堵增产的效果。张光伟等建立了一种堵塞孔隙结构的物理模型, 推导得到了储层微孔隙中流体的波动方程, 并提出了“压力主振型”和“流量主振型”两个概念, 通过模拟仿真的方法从振动理论的角度解释了水力脉冲波解堵的作用机制。梁春等提出波场作用地层时主要有两种基本形式, 一是激发储层本身产生振动, 二是水动力产生的液压波, 而水动力产生的液压波在油层中传播则主要以振动和冲击两种作用使得储层中的介质发生振动, 沉积在孔隙壁表面上的颗粒黏附物在不断地反复振动作用下逐渐剥离, 并分散到液体中被不断采出, 最终达到解堵增产的效果。蒲家宁等基于前人研究的成果, 提出了脉冲水射流水力共振理

论,并表示在特定条件下振荡型瞬变流会产生水力共振现象。蒲春生等提出井下低频水力脉冲的振源是通过井口泵入的脉冲流体来提供,作用于储层中的方式则主要为:井下振荡器自身所产生的纵向位移以及连续的高压脉冲水流所产生的横向水力冲击。在双重振动交互作用下,储层中的微裂缝不断进行延伸,孔隙内的流体的流动性能增强,同时在此过程中发生了空化、改善润湿性等现象,最终达到水井增注、油井增产的显著效果。

第三节 化学解堵动力学研究现状

油气田开发过程中所形成的无机垢包括黏土矿物膨胀,矿物的转化溶解沉淀,地层岩石微粒的运移、水垢等所引起的,主要成分为蒙脱石、高岭石、伊利石、石英、长石等的硅铝垢,以及由地层水矿化度高而导致的包括碳酸钙、硫酸钙及氢氧化钙等,对于无机垢的化学去除方法可以采用酸液体系;而地层中所形成的有机垢包括由于井筒附近压力、温度和化学组成的变化引起的孔隙中沥青质、胶质和石蜡等有机物的沉积等。对于有机垢的解除可以采取物理波动法、微生物法和化学法。化学法主要是采用沥青质分散解吸剂、抑制剂等。

目前,无机堵塞的化学解堵动力学多是基于酸岩反应动力学而开展研究,酸岩反应动力学研究进展如下:

在砂岩酸化热力学和动力学方面,Fogler、Lund 和 Mccune 等在单一岩石矿物酸岩反应的基础之上,提出了一系列不同的砂岩酸岩反应动力学方程,同时氢氟酸与石英砂的反应动力学、氢氟酸与长石的反应动力学,以及黏土的反应动力学都已有报道。对 HF 浓度的依赖关系是一级。

Labrid 通过对砂岩和氢氟酸的反应平衡常数计算,建立了酸岩反应过程中各种岩石矿物和酸液及产物的关系,主要的产物为 H_2SiF_6 及少量的胶态 SiO_2 ;黏土矿物发生酸岩反应后晶格改变均匀,形成了氟化络合物,同时 Hekim 和 Fogler 研究了土酸与各种岩石及黏土矿物的化学反应计量关系。

近年来,国外通过应用核磁共振、分维数试验、氢氟酸的化学计量学计算等方法并结合酸液流动模拟试验等研究了氢氟酸和氟硅酸同砂岩的反应机理。1995 年以来,Rick Gdanski 和 Gdanski R 等的研究结果表明,将酸岩反应中的过程分为三次,从而发现氢氟酸的一次、二次反应速率主要受氟化硅、氟化铝和盐酸之间的化学平衡而控制。

1987 年,樊勇等曾就实际砂岩岩心在土酸中的溶解动力学进行实验研究。1996 年,张黎明等利用表面化学和化学动力学理论,提出了硅质岩石矿物在土酸中的溶解动力学机理模型;该模型能较好地解释实验得到的动力学方程及速率理论计算结果。2000 年,王宝峰等结合岩心酸化流动模拟实验和 ICP 残酸离子分析,拟合了残酸中的硅离子浓度来研究氢氟酸与石英的反应动力学。深入认识各类岩石及黏土矿物,氢氟酸与铝硅酸盐的反应动力学,对于优化氢氟酸酸化施工过程中的参数是十分必要的。2006 年,刘德新等通过室内实验研究了缓速土酸与河砂颗粒的酸岩反应过程,根据实验数据拟合,得到河砂颗粒的溶蚀量、酸岩反应速率和粒度分布之间的关系,同时基于酸岩反应实验,建立了酸岩反应动力学模型。

在酸化数学模型方面,自1969年Schechter和Gidley等建立了描述砂岩反应的毛细管模型以来,Willams和Whiteley、Hill, Lbarid, Lund和Fogier, Hkeim和Folger, Taha, 赵立强、任书泉, Byrnat, Walsh, Li. Y, Sevougian S. D和Lake, L. W和Murtaza Ziauddin等相继建立了描述在地层多孔介质注入酸液后,孔隙结构中酸及矿物浓度分布的数学模型;这些酸化数学模型包括毛细管模型、慢反应模型、改进的毛细管模型、动力学模型、集总参数模型、分布参数模型、非均质模型、砂岩基质酸化(两酸三矿物)模型及地球化学模型等。酸化模型在逐渐不断地完善和改进,向着逐渐与酸化反应中的实际反应情况贴近,计算求解相对简便的方向发展。

目前,国内外对沥青质沉积、吸附和分散的研究机理做了一定的研究,尤其在沥青质沉积机理及模型研究方面做了大量研究,并建立了多种沥青质沉积模型,而在吸附和分散动力学方面研究却很少。

在沥青质沉积数学模型的研究方面,Hirschberg等和Kabir等基于Flory-Huggins溶液理论建立了沥青质沉积的溶解度模型;Gupta等和Thomas等分别建立了沥青质沉积的固体模型;随着对沥青质沉积机理认识的逐渐加深,20世纪80年代以来,Leontaritis、Puvvada和Firoozabadi等先后提出了表征沥青质沉积的胶体溶液模型;Chung和Thomas等根据热力学原理以及溶液理论,提出了预测石蜡-沥青质沉积的统一热力学模型。

在沥青质吸附及分散机理研究方面,Collins等通过实验的测定结果发现,沥青质在高岭石上的吸附是单分子层吸附,其吸附等温线符合Langmuir方程,且水膜的存在会抑制沥青质在高岭石表面的吸附。Buckley等通过室内实验研究了不同条件下沥青质在岩石矿物表面的沉积及吸附情况,并揭示了沥青质在油藏条件下的岩石表面的沉积吸附机理,认为沉积和吸附导致的岩石润湿性变化是岩石储层损害的主要原因之一。Nellensteyn于1924年首次提出将渣油和沥青作为胶体体系进行研究,研究者们尝试用各种实验方法研究沥青质在溶剂和石油体系中的分散状态,为了量化描述,人们还试图建立相关的模型,具体的研究方法包括:沥青质胶溶性能分析法(絮凝比-稀释度法、分光光度法及沥青质沉淀时间法)、流体力学参数法(特性黏度及对比黏度)、平均分子质量测定法(GPC、VPO)、光电显微分析法(SAXS、SANS、TEM、SEM)等。于维钊等考察在正庚烷、甲苯和吡啶3种溶剂环境中沥青质分子在岩石表面的吸附情况,采用分子动力学模拟方法,对羟基化石英表面上的沥青质分子吸附机理进行了研究,实验结果表明:正庚烷中沥青质在羟基化石英表面的吸附量最大,而在甲苯和吡啶中的沥青质吸附量相对较小;库仑相互作用能决定了沥青质在石英表面的吸附能力,而范德华相互作用则是沥青质与溶剂的主要相互作用。张磊等总结了石油沥青质的吸附机理,认为石油胶体体系、岩石矿物表面特征及水介质环境等因素影响了石油沥青质的吸附。沥青质主要通过氢键、范德华力、配位作用、偶极-偶极作用、离子交换等作用力在矿石表面进行吸附。常用吸附模型(吸附定温式)对沥青质的吸附机理加以描述,其中包括Langmuir定温式、BET定温式和弗伦德利希(Freundlich)定温式。丁福臣等利用流体力学参数法对石油沥青质的胶体分散特性进行研究,通过室内实验研究沥青质在有机溶剂中的流变学规律及其分散状况,最终计算了沥青质在有机溶剂中的缔和参数。鞠斌山等在国外用溶剂法开采沥青的油藏数值模拟研究基础上,建立了一个适合模拟用有机溶剂解除近井带油层有机堵塞的数学模型,利用有限差分法对模型进行了

数值求解,模拟了油田现场具体实例,结果表明该模型对油田现场的有机解堵应用参数的确定提供了一定的理论依据。

第四节 水力脉冲波协同化学解堵技术应用现状

水力脉冲波协同化学解堵技术作为一种新型技术,国内外研究都较少,尤其是在解堵机理方面。2004年,张荣军、蒲春生等针对孤东油田的稠油断块注汽压力普遍偏高的情况,首次提出了振动酸压复合作业解堵方法,对现场的注汽高压井采取了振动-酸压复合解堵措施,矿场实验结果表明:注汽压力下降平均值为2.0MPa,注汽干度也提高了53%,大部分注汽高压井实施措施后达到目前注汽设备的相应标准,该项复合解堵技术取得了较好的经济效益。2007年,张建国等针对所存在的单一解堵措施难以达到预期的解堵效果,且有效期短等弊端;提出了一种新的解堵方式,即水气脉冲波复合化学解堵技术,通过室内实验筛选和研制了热化学解堵剂的配方,探讨了化学解堵剂和堵塞介质之间的反应作用机制,将化学解堵剂与水气脉冲波相结合的解堵技术成功应用于孤岛油田的现场试验,施工前后油井的产油量和单井产液量最高增加分别6倍和7倍多,有效增加了累计增油量,且延长了有效期。2009年,董智涛等结合喇嘛甸油田的实际生产情况,提出了一种振动酸化解堵新技术,该项技术适用于低产、低效油水井近井处理,其包括两个技术关键:一是研制的井下具有双重振源的振动工具;二是优选的附有选择性的化学处理液-乳化酸液配方。低产、低效油水井的振动解堵技术将化学解堵与物理解堵相结合,两者相互协同、相互促进,有利于加强解堵效果;该项复合技术在喇嘛甸油田低产、低效井的现场应用取得了良好的解堵增油效果。2013年,饶鹏、蒲春生等针对青海尕斯低渗透油田所存在的“注酸困难,酸化效果差”等问题,将井下振源产生的水力脉冲波与化学酸化增产技术相结合,提出了适用于复杂油气田开发的一项水力脉冲波协同化学新型复合增产技术,该项新型复合增产技术现场应用大幅度提高了低渗透油田油水井近井地带的酸化效果,为青海尕斯低渗透油田创造了较好的经济收益。

第二章 水力脉冲波发生器设计及性能优化

目前，国内外对水力脉冲波采油技术现场应用的主要设备——水力脉冲波发生器进行了广泛的研究，现已研制成包括超声波振动器、人工地面振动器、井下水力振动器等各种类型的增产设施。脉冲波在地层中的传播，实际上是能量在地层中的传播，由波的衰减规律易知，声波频率越高，其能量衰减得越大；实践证明，地层对频率为 20kHz 的超声波，其衰减系数高达 6.85，而对 100Hz 的低频波，其衰减系数仅为 0.0246。当频率低于 15Hz 时，地层对它的衰减系数甚至更小至 0.00268，此时低频波对地层的有效影响范围达到 200m 以上，研究表明，声波频率与地层对声波的衰减系数成线性关系。本章通过对水力脉冲波发生器的参数设计、弹簧设计，开展了水力脉冲波发生器参数敏感性分析及性能优化，并对水力脉冲波发生器进行了现场测试。

第一节 水力脉冲波发生器设计

针对国内外现有水力脉冲波发生器的大量调研及系统的研究分析，设计出了大功率井下水力脉冲波发生器，该水力脉冲波发生器完善了以往国内外同类产品的特点，其具有低频率，结构简单，输出功率大，能量利用率高，并且现场施工方便，对油水井适用性广，经济效益好(包括作业费用低和投入产出比高)等优点。水力脉冲波发生器主要包括下端固定装置、弹簧、活塞气缸三大部分，水力脉冲波发生器的具体结构如图 2-1 所示。

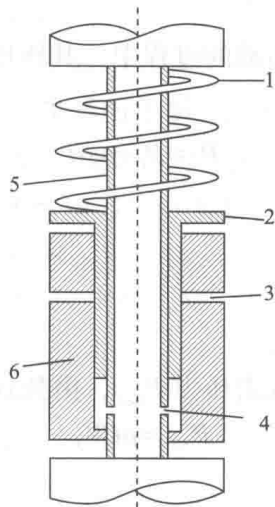


图 2-1 井下水力脉冲波发生器

1—弹簧；2—活塞；3—泄流孔；4—中心管小孔；5—中心管；6—活塞缸外套筒

水力脉冲波发生器的工作动力来源于井口泵入的工作流体。在现场施工条件下需将水

力脉冲波发生器连接至油管上,下放至目的层位,即可开泵。水力脉冲波发生器在不断流入的工作液的作用下,脉冲的振动能量作用于地层时,其主要方式为以下两种:

(1)水力脉冲波发生器在垂向上的位移振动,此振动是由活塞周期性振动的而形成的。振动的能量通过液压锚套管再传递给套管,然后作用于地层,最终使地层中的岩石颗粒发生位移上的振动。

(2)脉动水流所产生的横向振荡冲击波。高压水射流作用于套管或地层流体,最终引起脉动振荡。

这两种类型振动的综合效应,使地层中引起堵塞的颗粒得以脱落,裂缝得到更大的扩展,从而提高储层渗透率,对开发过程中解堵增注过程产生较好的改善效果。

一、水力脉冲波发生器规格

(1)外径 90.0mm,适用井径(裸眼井或套管井):114mm 以上。

(2)外径 114mm,适用井径(裸眼井或套管井):139mm 以上。

二、水力脉冲波发生器相关指标设计

工作排量: $200 \sim 800 \text{ m}^3/\text{d}$;

工作泵压: $10 \sim 40 \text{ MPa}$;

振动器外径: $d_1 = 90.0 \text{ mm}$;

振动器内径: $d_2 = 70.0 \text{ mm}$;

振动器壁厚: $e = 10.0 \text{ mm}$;

井深: $750 \sim 2000 \text{ m}$;

地层压力: 由实际的地层条件而定。

三、水力脉冲波发生器参数设计

(1)水力脉冲波发生器在向下运动的过程中,其作用在活塞表面上的压力 P_1 ,由公式(2-1)求得:

$$P_1 = P_0 + \rho g H \quad (2-1)$$

式中 H ——液柱高度, m;

P_0 ——泵压, MPa;

Q_0 ——排量, m^3/d ;

ρ ——工作液体密度, kg/m^3 。

(2)水力脉冲波发生器的最大水击压力 $P_{\max}$,由公式(2-2)求得:

$$P_{\max} = \rho C V_0 \quad (2-2)$$

其中:

$$C = C_0 / [1 + (d_2/e) \times (E/E_0)]^{1/2}$$

$$C_0 = (E/\rho)^{1/2}$$

$$V_0 = Q_0/A$$

式中 C ——水击波传播的速度, m/s ;

V_0 ——管内流速, m/s;

ρ ——工作液体密度, kg/m³;

Q_0 ——排量, m³/d;

E ——水的弹性模量, 2.06×10^9 Pa;

E_0 ——管柱弹性模量, 2.06×10^{11} Pa。

(3) 水力脉冲波发生器活塞向上运动时作用于小孔上的压力 P_2 , 由公式(2-3)求得:

$$P_2 = P_1 - P_{\max} \quad (2-3)$$

式中 P_1 ——作用在活塞表面上的压力, MPa;

$P_{\max}$ ——最大水击压力, MPa。

(4) 水力脉冲波发生器活塞下落的最大距离 $h_{\max}$, 由公式(2-4)求得:

$$h_{\max} = [b - b_1 + (9b - b_1)(b - b_1)^{1/2}] / (2a_1b) \quad (2-4)$$

其中:

$$a_1 = \xi \rho A_0 / m$$

$$b = P_1 A_0 / m$$

$$b_1 = P_2 A_0 / m$$

式中 A_0 ——活塞上的有效作用面积, m²;

m ——活塞的质量, kg;

ξ ——介质的弹性模量, Pa。

(5) 水力脉冲波发生器弹簧的最小弹性常数 K , 由公式(2-5)求得:

$$K = \{ 3P_1 + P_{\max} - [(9P_1 - P_{\max})(P_1 - P_{\max})]^{1/2} \} \xi P_1 \rho A_0 \times 10^6 / \{ m \times g \{ P_1 - P_{\max} + [(9P_1 - P_{\max})(P_1 - P_{\max})]^{1/2} \} \} \quad (2-5)$$

式中 P_1 ——作用在活塞表面上的压力, MPa;

$P_{\max}$ ——最大水击压力, MPa;

ξ ——介质的弹性模量;

ρ ——工作液体密度, kg/m³;

A_0 ——活塞上的有效作用面积, m²。

(6) 根据 K 值计算水力脉冲波发生器的频率, 由公式(2-6)求得:

$$f = (Cm + \xi \rho P_1 \times 10^6 A_0^2)^{1/2} \times [\xi A_0 (P_{\max} \times 10^6 \rho A_0 - Ch) + Cm]^{1/2} / \{ \pi m (Cm + P_1 \rho \xi \times 10^6 A_0^2)^{1/2} + [A_0 \xi (P_{\max} \times 10^6 \rho A_0 - Ch) + Cm]^{1/2} \} \quad (2-6)$$

式中 C ——水击波传播的速度, m/s;

P_1 ——作用在活塞表面上的压力, MPa;

$P_{\max}$ ——最大水击压力, MPa;

ξ ——介质的弹性模量, N/m²;

ρ ——工作液体密度, kg/m³;

m ——活塞的质量, kg;

A_0 ——活塞上的有效作用面积, m²。

(7) 水力脉冲波发生器共涉及 4 个出水孔, 出水孔的半径, 由式(2-7)求得:

$$R_0 = [(1.1078 \sqrt{Q_0}) / (C_1^2 P_b)]^{1/4} \quad (2-7)$$

其中:

$$P_b = P_1 - P_2$$
$$R_i = (R_0^2/4)^{1/2}$$

式中 C_1 ——水击波传播的速度, m/s;
 ν ——水的重度, kN/m³;
 Q_0 ——液体的流量, m³/d;
 P_b ——喷嘴处的压差, Pa。

按上述计算步骤亦可计算出当井深、泵压排量及地层压力的值发生改变时, 水力脉冲波发生器各个参数的相应变化值。

四、水力脉冲波发生器弹簧设计

(一) 活塞压应力对应弹簧弹性模量

根据水力脉冲井下发生器参数的设计方法, 给出水力脉冲波发生器活塞对应压应力和弹性模量的关系, 见表 2-1。由此实现井下振动参数的设置。

表 2-1 压应力和弹性模量的关系

活塞压应力/MPa	弹簧弹性模量/(N/mm ²)
10	6925
15	24648
20	60136
25	119646

选择弹簧的尺寸, 其内径定为 $D_1 = 0.045\text{m}$, 中径定为 $D_2 = 0.050\text{m}$, 外径定为 $D = 0.055\text{m}$, 最大变形系数为 $X = 0.4403\text{m}$, 所使用的弹簧型号为两短圈磨平并紧式, 现场应用时应根据实际需要合理选用相应的弹簧。

(二) 水力脉冲波发生器柱塞密封套设计

为满足水力脉冲波发生器工作时脉冲高温液体和气体的需要, 对水力脉冲波发生器柱塞密封套选取全氟醚橡胶材料, 它具有耐高温、耐化学溶剂性能及高洁净特性, 耐化学药品及腐蚀性介质(耐强酸、强碱、醚类、酮类、酯类、含氮化合物、碳化氢类、醇类、醛类、油、蒸气类、氨基化合物等 1600 多种化学产品的腐蚀), 耐温达 327℃。

五、水力脉冲波发生器参数敏感性分析

以下涉及参数说明:

P_0 为泵压, Pa; Q_0 为泵入排量, m³/d; H 为作用井深, m; P_1 为地层中液体传播压力, MPa; H_1 为活塞下降高度, cm; K 为弹簧弹性系数, kgf/m (1kgf/m = 9.8N/m); f 为弹簧振动频率, Hz; m 为活塞的质量, kg; R_i 为小孔直径, cm。

(1) 井深 $H = 1000\text{m}$, 液体传播压力 $P_1 = 10\text{MPa}$ 为定值时, 参数变化关系。

由表 2-2 可以看出, 当排量不变, 泵压改变时, 随着泵压的增加, 活塞下降高度降低, 弹簧的弹性系数增加, 水力脉冲波发生器的振动频率增加, 出水孔的直径逐渐减小。