

中国石油大学（华东）

硕士学位论文

负压脉冲射流洗井机理研究

姓名：贾学臣

申请学位级别：硕士

专业：油气井工程

指导教师：杨永印

20080401

摘 要

油井在采油生产过程中,油井炮孔出现的各种堵塞物严重影响油井的正常生产。负压脉冲射流洗井技术可以有效清除炮孔堵塞,起到增产增注效果。本文理论和实验相结合对负压脉冲射流洗井过程中水力参数、振荡腔结构参数对压力脉动幅值的影响,以及脉冲波在堵塞炮孔中的传播衰减规律展开研究。

为了研究负压脉冲射流的洗井机理,利用人造岩样模拟炮孔堵塞物,实验研究了负压脉冲射流的部分洗井机理,实验发现:负压脉冲冲击可有效降低人造岩样强度;负压脉冲射流的负压对于提高人造岩样渗透率非常有利;脉冲幅值越大,对人造岩样的清洗效果越好;脉冲射流作用的时间越长,对人造岩样的清洗效果越好。

根据工作原理,设计了负压脉冲射流清洗炮孔模拟装置,理论和实验研究了水力参数、振荡腔结构参数对负压脉冲射流脉动幅值的影响,实验发现:负压脉冲幅值随工具压降的增大而增大;负压脉冲幅值随振荡腔室体积增大而减小。利用炮孔填砂模拟堵塞程度,通过实验得到了负压脉冲射流在不同堵塞程度的炮孔中压力波的衰减规律,堵塞越轻,负压波衰减越轻,其有效传播距离越大。

关键词: 负压脉冲, 洗井, 振荡腔, 机理

Study on Mechanism of Well Washing with Negative Pressure Pulse Jet

Jia Xuechen (Oil & Gas Well Engineering)

Directed by Associate Professor Yang Yongyin

Abstract

During the process of oil production, the borehole wall and shotholes may deposit scale, salt and so on which affects the oil wells normal production. The technology of well washing with negative pulse pressure jet can improve the blocking of the shotholes in oil wells. It can stimulate the oil well production and the injection; increase the benefit of the oil field. This paper theoretically and experimentally analyze the effect of hydraulic parameters of the negative pressure pulse jet and the structure of oscillator on the amplitude of negative pulse, and the diffusing characteristics of the negative pressure pulse in the blocked perforation.

In order to study the mechanism of well washing with negative pressure pulse jetting, use of artificial rock simulated hole sediment, many different experiments were designed, and the result shows that the impact of negative pulse can effectively decrease the intensity of the stemming; the negative pressure is very available to the permeability improving of the blocked perforation; the greater the pulse amplitude and the longer the cleaning time, the better the cleaning effect.

The simulation experiments of the perforation cleaning with negative pressure pulse jet were taken. And the effect of the hydraulic parameters, the structure parameters of oscillator and the character of shotholes block on the pulse amplitude was studied. The results show that the pressure at the entrance of the negative pressure pulse jet modulator and the decrease of the ambient pressure. By sands filling to simulate the plug level, the diffusing characteristics of the negative pressure pulse jet in different plugging degree of shot holes were studied. The negative pressure pulse amplitude gradually decreases with the plugging degree, and the little the plugging degree, the more soft decreasing of pressure pulse attenuation, and the effective propagation distance is longer.

Key words: Negative pressure pulse, Well washing, Oscillate chamber, Mechanism

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所提交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人或他人为获得中国石油大学（华东）或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：贾学臣

日期：2008年 5月 26日

学位论文使用授权书

本人完全同意中国石油大学（华东）有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：贾学臣

日期：2008年 5月 26日

指导教师签名：杨永印

日期：2008年 5月 27日

第一章 前 言

1.1 研究目的及意义

本论文是研究负压脉冲水射流技术在洗井上的应用，提高油井炮孔附近油层渗透率，产生增产增注效果，提高油田的经济效益。

油井在采油生产过程和注水过程中，油井井壁会存在结盐、结垢及速敏等现象，这种现象会带来各种堵塞物，使得油流通道不能正常流动，这严重影响油井的正常生产。而且油井在完井生产和修井等作业过程中，地层也会受到各种污染，这些污染对油层的伤害十分严重，可导致产油量下降，甚至停产。这些现象在东部老油田表现得更为突出。因此，如何有效的清除各种井壁堵塞物，从而恢复和提高油井的产量，成为影响油田特别是老油田生产的关键因素之一。为解决这一问题，油井清洗成为一种必要而有效的手段。所以，油井洗井技术已越来越引起人们的重视。

油井的清洗有常规酸化洗井或注水以及注聚合物等方法，这些传统的洗井方法虽然取得一定的效果，但存在很多缺陷，如施工复杂，成本高，作业效果不明显，而且可能造成新的污染。能不能寻找一种避免这些缺点的洗井技术成为困扰人们的问题。经过研究人员的不断努力，终于发现高压水射流洗井技术可以成为最佳的替代技术。这种技术能够对油井污染层进行有效的清洗，恢复原产层的渗透率，从而恢复油井的生产。实践证明，高压水射流洗井确实是一种清洁无污染的洗井方式。

高压水射流洗井包括空化射流洗井，磨料射流洗井，负压脉冲射流洗井等方式。其中负压脉冲射流洗井技术，由于可以在井筒的有限空间内产生极强的负压作用，故该项技术具有井壁清洗物容易进入井筒以及脉冲产生的高低频振荡波协助清除井壁堵塞物等优点。这一点是其他的射流洗井技术无可比拟的。所以，脉冲射流洗井技术具有无限广阔的发展前景。

近年来国内外对该技术的研究已经取得了一定程度的进展，已经有一定数量的油井采用了该技术进行洗井。实践证明，利用脉冲射流洗井确实可以在一定范围内提高油井的产量，取得了良好的经济效益。但目前，只是从脉冲射流工艺技术上有所完善，而对于脉冲射流使油层增产机理方面的研究却很少，或者说进展缓慢。对于脉冲射流产生的高低压脉冲如何提高油层渗透率，到现在还没有足够的理论和实验来计算和加以验证。

因此，为了促进脉冲射流技术在采油工程中的进一步发展和应用，促进脉冲水射流

技术在开发老油田，提高原油采收率方面的应用，满足技术攻关的需要，开发负压脉冲射流振荡洗井技术以提高采收率技术的理论和实验研究是十分有意义的。而且这种技术与其他技术相比具有不伤害被清洗的机体，清洗效率高、成本低，同时还不污染环境等优点。所以脉冲水射流洗井技术具有广阔的发展前景。

1.2 本文的研究内容与研究方法

在学习、借鉴国内外专家学者研究成果和广泛调研的基础上，结合国内外各种洗井工艺的实际情况，对负压脉冲射流洗井技术进行研究。具体研究内容如下：

(1) 理论分析负压脉冲发生器水力参数、振荡器结构参数等对负压脉冲波幅值的影响，以及脉冲波在堵塞炮孔中的传播特点；

(2) 实验研究负压脉冲射流的洗井机理。从实验的角度具体分析负压脉冲射流幅值、清洗时间对洗井效果的影响规律以及负压对炮孔堵塞物的作用效果；

(3) 设计负压脉冲射流清洗炮孔模拟装置，实验研究水力参数、振荡腔结构参数对负压脉冲射流脉动幅值的影响；

(4) 利用炮孔填砂，通过实验研究负压脉冲射流清洗不同堵塞程度的炮孔中的传播特点，评价清洗效果。

第二章 国内外研究现状

2.1 高压水射流洗井技术发展概况

石油行业是高压水射流清洗技术应用比较广泛的行业。其中高压水射流用于油井清洗方面的研究已经日益引起人们的重视。油井洗井技术包括机械清洗，化学清洗法，高压水射流清洗法。其中，传统的机械洗井方法和化学清洗方法存在许多缺陷，施工复杂，成本高，作业效果也不是特别明显。而且有可能对产层造成污染。射流洗井作为一种清洁、高效、对环境无污染的清洗技术，应该得到大力推广^[1]。

在国外，以前苏联和美国为代表对高压水射流应用在洗井方面已进行了一定的研究和现场应用。并且将高压水射流技术与连续管钻井技术结合在一起，取得了很好的经济效益^[2]。

在国内，一些高校和科研单位也在从事高压水射流洗井方面的研究。中国石油大学在研究自振空化射流技术及处理地层机理的基础上，研制成功了利用高压水旋转射流处理近井地层增产增注技术。自 1995 年以来，先后在辽河、胜利、中原等油田 500 多口油水井进行了现场试验和应用，取得了明显的效果^[3]。中国石油大学的李根生等人对高压水射流处理地层的机理进行了分析并进行了相关试验。高压水射流深穿透处理地层的三种机理^[4]即低频旋转水力波、高频振荡射流冲击波和空化噪声超声波。实验室测试了解堵工具的旋转速度特性、冲击压力特性和射流冲击压力随喷距的变化规律。结果表明，随着喷距的增加，射流冲击力逐渐减弱。在实验的泵压 20.0MPa 条件下，射流压力作用深度可达 0.6m 以上。经辽河油田 23 口油井现场试验表明，高压水射流深穿透解堵技术平均单井增油幅度可达 20%—50%，有效率达 90%以上。是高含水期油田强化生产、增产增注、提高采收率的一种高效技术。

水力振动增产的机理就是利用振动原理处理油层的技术。其基本原理：以水力振动器作为井下震源下至处理井段，地面供液按一定排量将工作液注入振动器内，振动器依靠流经它的液体来激励、产生水力脉冲波，对油层产生作用，实现振动处理油层^[5]。

早在 1957 年，苏联的 C.M.加奇耶夫就研究了水力振动对地层模型的影响。并且确定了形成水力脉冲的机理和特性。1960 年，C.M.加奇耶夫首次进行了应用水力脉冲波振动法处理近井地层的矿场试验。获得了成功。从 1967 年起，此法开始应用于石油矿场企业之中。在 1967 年至 1975 年期间，阿塞拜疆、巴什基里亚、克拉斯诺达尔等油气

业管理局的油井作业统计资料表明,应用水力脉冲波振动法的经济效益较好:增产采油量 280 万 m^3 ,增加注水量 2200 万 m^3 ,获得利益 400 万卢布^[6]。

早在 50 年代,美国就开始了声波增产原油技术的研究,并且取得了初步成功^[7]。1954 年 2 月,博丁博士申请了“提高采油量的声波系统”的专利。后来,美国图尔萨大学的布兰登博士接连申请了二十多项声波增产技术方面的专利。

美国休斯顿 SPOR 公司也研制了一种井下声波发生装置,并在两口井上试验成功,产油量明显增加。所以,在 60 年代,美国就把声波增产技术列入了采油新工艺的研究范畴^[8]。《世界石油》杂志也多次报道了声波强化采油试验取得的新进展。

在国内,一些高校和科研单位也在从事高压水射流脉冲波洗井方面的研究。中国石油大学在研究自振空化射流技术及处理地层机理的基础上,研制成功了利用高压水旋转射流处理近井地层增产增注技术。

胜利油田的尹强^[9]等人对压力脉冲的影响因素进行了分析并进行了室内实验研究。其利用油层岩样和地层模拟流体,模拟地层条件,通过多项研究实验,得出①振动时只有在一定频率范围内岩样模拟渗透率有明显提高。②当振源的振动频率选择在岩样固有频率附近时,才会使岩样模拟油渗透率有相当大的提高。水动力波在油层中传播,以振动和冲击作用激发振动场内的介质,使沉积在油层空隙中固体附着物逐渐松动脱落,分散在液体中被采出液带走。达到疏通油层通道的目的。而且脉冲波还可以改善井底地带的渗流状况,实现油井增产。由于机理相同,所以脉冲射流产生脉冲波而达到使油井增产的目的。

中原油田的杨永超从动力学角度对高压水射流洗井的基本原理、工艺技术及有关的计算方法加以论述。吉林油田的梁春^[10]等人利用振动波场的作用经济有效的利用能量。胜利油田的牛世龙通过分析近井地带渗透率下降的原因,介绍了小直径水力振荡器的工作原理、施工工艺、实施效果,指出小直径水力振荡器提高油流渗透能力效果比较好,是一种简单易行的工艺解堵增产措施。

吉林油田钻采研究院受国外的启发,研究成功了水力振动增产技术。1991 年以来,经在吉林、大港、大庆、玉门等油田应用,取得了显著的增产效果和经济效益。

目前有些学者从事水力振动解堵技术的研究,但是对于如何使井筒污染物更轻易的进入井筒的问题还没有深入地研究。负压脉冲技术洗井正好具有这个优点,而且国内还鲜见有关负压脉冲射流洗井技术的文章。本研究的主要任务是对负压脉冲射流洗井机理进行理论分析和实验研究,其目的是对负压脉冲射流洗井影响因素和洗井工具展开深入

地研究，为进一步的研究负压脉冲射流洗井技术奠定一定的理论基础。

2.2 负压脉冲射流技术发展概况

负压脉冲射流^[11]是指在常规洗井、钻井等过程中，利用连接在管柱间的负压脉冲射流调制器调制射流使其能够在井底附近区域内产生脉动性低压。

负压脉冲射流调制器调制射流产生脉动低压的基本工作原理^[12]是在内部安装开关阀，周期性阻断钻柱内流体的流动（如图 2-1），调制射流使得井底压力产生周期性的瞬间降低。在开关阀阻断流动瞬间，井底附近区域内的流体在惯性作用下继续流动，这就使得该区域内瞬间产生脉动低压。

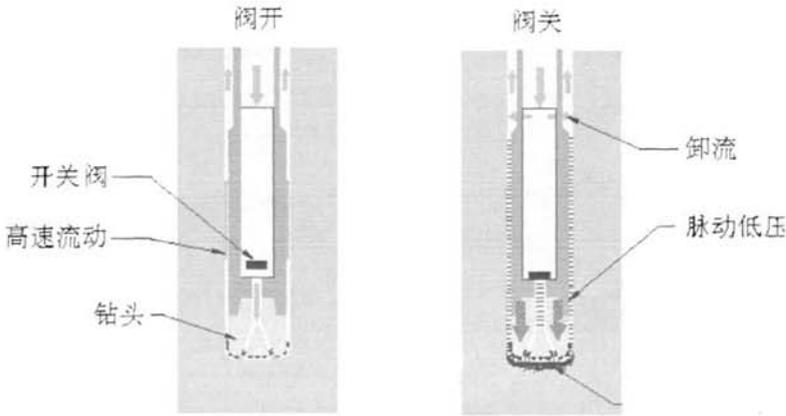


图 2-1 负压脉冲射流工作原理图

Fig2-1 The principle map of the negative pressure pulse jet

负压脉冲射流的调制机理^[13]分为压力波调制和剪切波整流两大类。低压脉冲射流调制是指淹没条件下使喷速瞬间发生变化，促使射流中产生压力波的激励过程。剪切波整流是通过一定模态和频率的扰动促使射流中具有相关频率的不稳定剪切波得以发展、合并最终形成大涡环的激励方法。前者调制压力波，属于纵波整流，射流中可产生频率相对固定的压力波；后者调制的是涡，属于漩涡耦合整流范畴，射流中静压力变化不大，速度或动压力发生波动，波动振幅有限，频带宽。

因此，若使射流产生一定频率的压力脉动，必须采取压力波整流。压力波动在管道运输工程中是极力设法避免的有害现象，如管道流在某处瞬间启闭时，则在上下游产生水击增压波或降压波，容易导致上下游管道的破裂^[14]。而负压脉冲射流的调制正是利用这一瞬变流原理来调制射流产生低压波，将其应用于钻井工程^[15]，变害为利，从而改变井底岩石的压力状态以促进钻井速度的提高。根据瞬变流原理^[16]，管道内的压力波动与

流体性质和流动状态有关，当流量产生瞬间变化时，下游产生的水击压力波动可由动量原理得出：

$$\Delta P = \rho a \Delta V \left(1 + \frac{V_0 + \Delta V}{a}\right) \quad (2-1)$$

ρ ——介质密度， kg/m^3 ；

a ——波速， m/s ；

Δv ——速度变化， m/s ；

v_0 ——初始速度， m/s 。

其中波速同样由动量定理得出：

$$a^2 = \frac{E/\rho}{1 + (E/A)(\Delta A/\Delta P)} \quad (2-2)$$

E ——流体体积弹性模量， Pa ；

A ——流道截面积， m^2 ；

ΔA ——压力引起的流道截面积的变化， m^2 ；

Δp ——压力差， Pa 。

对于刚性流道 $\Delta A \approx 0$ ：

$$a \approx \sqrt{E/\rho} \quad (2-3)$$

对于刚性流道中流速变化与水击压力波的关系：

$$\Delta P = \Delta V \sqrt{\rho E} \left(1 + \frac{V_0 + \Delta V}{\sqrt{E/\rho}}\right) \quad (2-4)$$

当流动瞬间变化 $\Delta V = -V_0$ 时

$$\Delta P = \Delta V \sqrt{\rho E} \quad (2-5)$$

式 (2-5) 给出了流动瞬间停止和开启时等直径刚性流道下游产生的压力升降值。因压力波为纵波，所以实际产生的水击压力大小与流动启闭过程的持续时间 t 关系很大，而且不同时刻不同位置处的压降值直接由压力波和反射波的叠加确定。如下游限流流道的长度为 L ，当 $t < L/a$ 时，压力波尚未传到末端，无反射波，压力值与位置有关，阀门处最大。假设钻头短节内有一定速度的钻井液，在调制器开关阀瞬间关闭时，根据式

(2-11) 估算, 当 $\Delta V=10\text{m/s}$ 时 ($\rho=1.040\text{kg/m}^3$, $E=2.0\text{GPa}$), $\Delta p=14.42\text{MPa}$, 可见 10m/s 流速的动量变化产生的瞬间脉动低压幅值理论上高达 14.42MPa 。

负压脉冲射流首先于上世纪的 50 年代初期应用在石油钻井中, 但是由于钻井设备、钻井工具等条件的限制, 该技术并没有得到广泛应用。随着钻井向着深部地层发展以及钻井设备的更新, 负压脉冲射流钻井技术又逐渐成为各国研究的热点^[17]。由于钻井工艺以及设备材料等条件的限制, 负压脉冲射流钻井技术在国内还处于发展阶段。中国石油大学(华东)高压水射流研究中心对负压脉冲射流提高钻速的机理做了大量的研究^[18], 认为负压脉冲射流可以降低待破碎岩石强度, 消除井底岩屑的“压持效应”。目前, 负压脉冲射流在洗井方面的应用还未见报道, 本文通过理论分析与实验相结合的方法来研究负压脉冲射流的洗井机理, 对负压脉冲射流洗井装置的设计与应用提供依据。

2.3 低频水力振动洗井机理

低频水力振动技术是利用地下的人工震源及其配套设备产生高能振动, 形成强大的低频声场和水波振动场, 利用低频波穿透力强、衰减小、传递远等特点, 穿透地层传播到很远的储油层, 从而在油层中形成共振驻波, 反复振动、振荡、疏通渗流通道, 改善油藏的渗流特性, 降低油、水、生油岩之间的界面张力, 改善原油特性、降粘、降凝, 并使原油迅速向声源方向(井筒)流动, 从而提高油井产量和原油采收率^[19]。其具体机理简述如下。

2.3.1 低频水力振动对油层岩石的造缝作用

低频脉冲波可使岩样形成网状微裂缝和少量宏观裂缝, 这里从波动力学、材料断裂力学和岩石力学等方面来分析解释。强大的低频脉冲波由于在地层中衰减系数小, 传播距离远, 就给地层岩石及孔隙介质内的油水较强的冲击振动力, 并使孔隙中流体产生加速度^[12]。对于油层岩石来说, 由于长期的地质学作用, 存在断层、裂缝、层理及微裂隙, 可把油层岩石视为非连续均匀材料(介质), 从而可应用材料力学和断裂力学理论来分析脉冲波的造缝机理。材料力学和断裂力学理论指出, 在高速加载(冲击)条件下, 材料的断裂强度明显降低, 最大应力值一般低于静载作用下的抗拉强度。在强大的脉冲波的冲击载荷作用下, 地层岩石的疲劳强度远低于静水柱压力载荷的疲劳强度, 这种脉冲振动作用使得非连续均匀的岩石产生相对撕裂的剪切应力, 当超过岩石的抗疲劳强度, 就会产生微裂缝或宏观裂缝, 且可以高速向前扩展, 这种扩展直至冲击力与岩石的疲劳应

力相平衡时,才会停止。由于低频脉冲波可传播到远井地带还保持一定的作用强度,故可疏导远井地层,产生一系列的解堵、增渗、强化采油及增注效果。

2.3.2 低频水力振动对界面特性的影响

低频脉冲波振动可改变油层孔隙介质中固—液、油—水界面状态及毛管力束缚作用,使油、水重新分布和运移。油层砂岩包括岩石颗粒、充填粘土矿物、饱和的油气水等复杂的介质体系。它们的密度等物理性质不同,脉冲声波作用时其声阻抗不同,产生的振动加速度和速度各有差异,从而在固—固(粘—胶结物)、固—液、油—水—气相界面上产生剪切应力,声阻抗差异越大(如固体与液体),接触面上剪切应力就越大,结果就出现如下效应:

(1) 岩石颗粒表面粘土胶结物被振动脱落,孔喉充填桥状粘土微粒会松动和迁移,解除孔喉道堵塞,扩大孔隙半径,改善孔隙连通性。

(2) 改变固液界面动态,克服岩石颗粒表面对原油的吸附亲合力,使油膜从颗粒表面脱落。

(3) 改变孔隙介质中油、水、气界面动态,克服毛管力的束缚滞留效应,并使油珠、油柱状分散的剩余油重新分布、聚并,便于排驱出来。

(4) 降低油水界面张力,国外实验证实^[20],在声振动场中,油水界面张力降低2-3个数量级,达到 10^{-4} - 10^{-5} N/m低界面张力驱油界限。

2.3.3 低频水力振动改善孔隙附面层的结构

当液体在孔隙中流动时,由于液体的粘性和壁面的吸附作用,紧贴壁面的一层液体流速为零,我们把壁面到均匀流速层间的液体层称附面层。附面层受到某些作用(如振动、流动截面改变等)时会变薄或与壁面分离。声场对附面层有以下三方面作用^[21]:

(1) 反射作用。当声波自液流入射时,遇到壁面将发生反射,反射波推动附面层内的液体流动,降低附面层厚度。

(2) 振动作用。入射波和反射波的迭加以及声波振幅的变化都使附面层内液体受到振动而与壁面分离。

(3) 剪切作用。由于附面层与岩石这二者的弹性模量不同,其声阻、振动速度和加速度都不同,声波使岩石与附面层之间产生一个剪切力,促使附面层与壁面分离。因为声波对附面层的上述作用,相应扩大了液体流道,加快了液体流速,提高油层渗透率。

2.3.4 低频水力振动对原油流变性的影响

负压脉冲波在地层中传播时，其衰减的能量转化为热能，这种热能被原油吸收，同时在不同介质的分界面处，边界摩擦使油体温度升高。并且负压脉冲频率越高，振动越剧烈，吸收效果越好。

边界摩擦除了对原油产生局部加热作用，在原油与结蜡层、管壁及岩石的分界面处，由于振动速度的巨大差异，使得原油与结蜡层、管壁及岩石分界面之间发生摩擦，产生局部高温，导致原油粘度的降低。对于粘度较大的原油，吸收系数大，所造成的局部温升是十分可观的^[22]。

而且交变的振动作用加速了原油中大、小分子之间的相对运动，使原油的结构发生变化，甚至使部分大分子断裂为小分子，从而降低原油的粘度^[23]。

所以经低频振动处理后的原油其粘度下降明显，这是负压脉冲射流产生的低频振动从而改善采油、提高油井产量的主要机理之一。

2.4 负压脉冲射流洗井机理

井底负压脉冲射流洗井装置可以在炮孔附近一个圈闭的空间里产生相对负压，这样在油层和井底之间、井底和井口之间，就产生了一个附加压力差。在此负压差的诱导作用下，油层中的流体迅速流至井底，把油层和井壁上的杂质携带至井筒，进而流到地面，从而解除了井壁污染，疏通了井壁周围油层的孔隙孔道，改善了渗流状况，提高了油层的渗流性，有利于流体渗滤，达到最终提高油井产量的目的。

井底静液柱压力与地层孔隙压力之间的压差是影响洗井效果重要因素之一。其主要原因是井底压力差对刚清洗污染物具有阻碍作用^[24]。影响了污染物的及时排泄。从而大大降低了洗井装置的清洗效率。在低渗透性岩层清洗时，压差对清洗效果的影响比高渗透性岩层内的影响更大，这是由于洗井液更加难以深入低渗透性的岩层孔隙中，不能及时平衡清洗岩层的表面的压力差。负压脉冲射流洗井能有效避免这种压差效应，从而有效的提高洗井效果。这一优点也是与普通射流清洗油井所不同的。

就脉冲射流的洗井机理的负压作用^[25]主要可简述如下：

(1) 净化作用：施工过程中，工作介质在连续交变压力作用下，油流通道中会产生“水击”现象，被圈闭的流体在负压作用下，迅速地冲向井腔，有效地剥蚀套管孔壁上的沉积物，使射孔部分的孔道堵塞物疏通，在瞬间负压的作用下，促使挤入油流通道中的介质全部流入井筒，继而排到地面，从而达到净化渗流通道，解除孔眼堵塞的目的。

(2) 清洗作用：在负压反复产生的条件下，油层受干扰的近井地带保持相当高的

最大压力梯度，它远远超过一次负压条件下的压力梯度。且最大压力梯度不是发生在井壁上，而是发生在接近井壁的近井地带，并随着深入地层内部而消失。由于从时间上与瞬间井底负压相吻合，所以减少了空隙空间基岩上的压紧力，更有利于分散相从油层流向井腔，实现对地层的清洗，解除孔隙堵塞的目的。

(3) 疲劳效应：岩石在交变压力下发生破坏时，最大应力值一般低于静荷载作用下岩石的抗拉强度。施工过程中负压的反复产生，圈闭的流体沿最小水平主应力的垂直方向冲向井腔，起到拉开岩石的楔子作用，这样，易于岩石造成微裂缝。

(4) 扩展效应：在疲劳效应下造成的微裂缝。继续承受交变压力时，会使原裂缝扩展、微裂缝扩展。这样在近井地带，由于负压的不断产生，将造成若干微裂缝，从而提高地层的渗透率，改善其渗流性能。

(5) 排挤效应：堵塞地层的乳化物、残余水，在周期性负压的作用下将会被排出，而堵塞地层的颗粒则在正反方向的荷载作用下，被推移到裂缝和孔隙的窄道和扩展处，有助于颗粒脱离原位置而被破坏，从而增强流体的流动性。

从渗流力学的角度我们也可以看出流体的流量与压差成正比例关系。从渗流力学^[26]中的达西公式：

$$Q = \frac{K}{\mu} A \frac{\Delta P}{L} \quad (2-6)$$

其中 Q 代表通过砂岩的流量， ΔP 代表两渗流截面间的折算压力差。所以从公式 2-6 中可以看出 Q 与 ΔP 呈正比例关系。既渗流量的大小与两端压差呈线性关系，两端压差越大，渗流量就越大。由此可以从渗流学的角度证明了负压脉冲在清洗岩层表面产生的负压差有利于液体的流动，从而增加了流入井筒中液体的流量。

2.5 本章小结

本章通过对高压水射流洗井技术的调研发现，水射流洗井可以清洗井底炮孔及周围区域，清除炮孔堵塞物，提高产层渗透率，对油水井增产增注、提高油田经济效益具有重要作用。另外，为了提高洗井效果，国内外专家学者还对低频水力振动技术等做了深入研究，并对其洗井机理做了分析。负压脉冲水射流可以在井底局部空间产生负压，炮孔中的堵塞物更容易被诱导流出，对炮孔的冲洗效果更好。但是对负压脉冲射流的研究主要集中在钻井领域，在其洗井上的研究很少，本文通过理论分析和实验，对负压脉冲发生器水力参数、振荡器结构参数等对负压脉冲波幅值的影响，以及脉冲波在堵塞炮

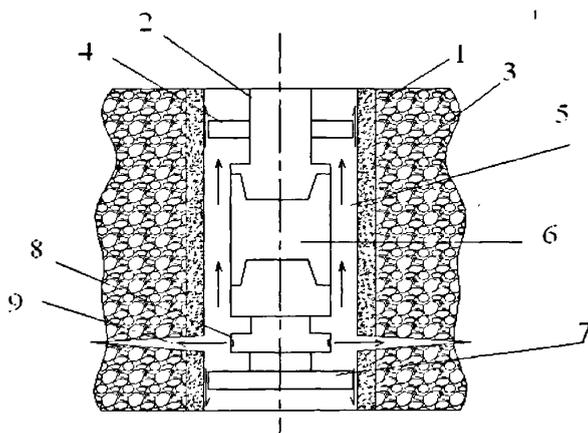
孔中的传播特点等进行研究，给负压脉冲射流洗井技术的研发提供依据。

第三章 负压脉冲射流洗井工作原理及理论分析

负压脉冲射流能够有效的清洗油井中炮孔里的堵塞物，使得油流通道畅通，是油水井增产增注的一个重要途径。负压脉冲幅值是影响负压脉冲射流清洗效果的一个重要参数，研究负压脉冲发生器水力参数、振荡器结构参数等对负压脉冲波幅值的影响规律，评价炮孔不同深度处负压脉冲射流的作用效果，对于负压脉冲发生工具进行改良具有一定的指导意义。

3.1 负压脉冲射流洗井工作原理

负压脉冲射流发生器是用振动法激活油层的一种有效工具。用油管将脉冲发生器下到油井的油层段，脉冲发生器的上下阻流保压接头将井筒“封隔”在井下的环形空间内，在该空间内产生液压振动波，此振动波穿过套管的射孔孔道以强烈的交变压力作用于油层，在油层内产生周期性的张压应力。该交变应力的的大小可认为是负压脉冲的幅值的大小，该幅值的大小决定了对油层的作用效果。油层炮孔内的堵塞物在负压脉冲射流的作用下会发生破坏，从油层中破碎成小颗粒并随液流排出油层通道。



1.水泥环 2.油管 3.污染带 4.阻流保压上接头 5.振荡腔
6.脉冲发生器 7. 阻流保压下接头 8.喷嘴 9.炮孔
图 3-1 负压脉冲射流洗井工作原理图

Fig3-1 Operating principle picture of well washing with negative pressure pulse jet

负压脉冲射流洗井的工作原理如图 3-1 所示。负压脉冲发生装置下至井底炮孔堵塞的位置，发生器上端用阻力保压上接头封隔，下端是旋转喷头，下接头连接在喷头下端，上下接头中间形成振荡腔，发生器产生的负压脉冲射流在振荡腔内振动产生振动波，其对封隔的污染炮孔产生巨大的冲击作用，振荡腔内的液体从上接头流出，上接头从而起

到阻力保压的作用。

在井下负压脉冲射流清洗机理主要作用包括：(1)炮孔的堵塞物在负压脉冲射流产生的交变应力作用下，炮孔内部堵塞物抗压强度下降，使得堵塞物容易破碎，然后流入井筒后排出。(2) 负压脉冲射流能够在井下产生有利于污染物排出的负压作用，在这种负压作用下，被冲蚀脱落的颗粒更容易进入井筒。

3.2 负压脉冲射流发生器压力脉冲幅值计算

针对井下负压脉冲射流的压力幅值究竟如何从理论上进行计算，是本文研究的问题。对负压脉冲射流洗井情形可做简化，即截面 1-1 是综合考虑脉冲发生器与旋转喷头接头以及接头喷嘴的截面变化，截面 2-2 是考虑井底封隔振荡腔截面变化，截面 3-3 是考虑振荡腔与炮孔直径的差异，炮孔中的砂粒是模拟炮孔堵塞物，腔室上的喷嘴直径是考虑阻流保压接头与井眼直径的差值。如此简化可得负压脉冲射流洗井示意图如图 3-1 所示。

笔者认为可以将脉冲射流的产生过程分为脉冲发生器连通和阻断两个过程。对连通和阻断两个过程的炮孔尾端位置处的水力压力分别进行计算。脉冲幅值可以认为是连通和阻断时炮孔尾端位置处的静压力差值。

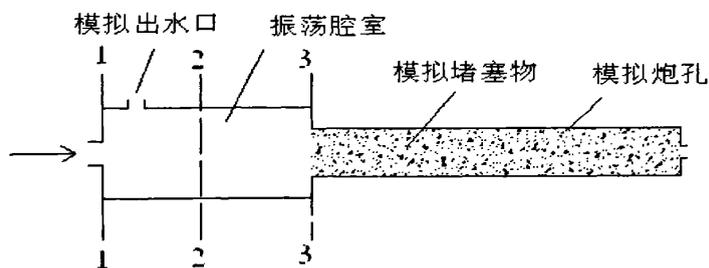


图 3-2 负压脉冲射流洗井示意图

Fig3-2 Schematic figure of the well washing with negative pulse jet

经过负压脉冲射流发生器产生的负压脉冲射流经过振荡腔室和炮孔后，到达炮孔尾端的脉冲压力是经过压力损失的最后静压力，从图 3-2 可以看出，当脉冲发生器连通和阻断时，炮孔尾段必然有一个压力差值。通过研究这个压力差值的影响因素，也就是负压脉冲幅值的影响因素，从而模拟射流在井底产层油流通道的实际情况，寻找规律，对现场应用起指导作用。

3.2.1 脉冲发生器连通时压力计算

(1) 流体在断面 1-1 的局部压力损失

由工程流体力学中的反映突然扩大的局部水头损失的包达公式^[27]知:

$$\begin{aligned} h_{j1} &= \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} = \frac{(1 - \frac{v_2}{v_1})^2 \cdot v_1^2}{2g} \\ &= (1 - \frac{d_1^2}{d_2^2})^2 \cdot \frac{v_1^2}{2g} \\ &= \zeta_1 \frac{v_1^2}{2g} \end{aligned} \quad (3-1)$$

$$\text{所以 } \Delta p_1 = \gamma h_{j1} = \rho g \times \zeta_1 \times \frac{v_1^2}{2g} = \frac{1}{2} \rho \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 v_1^2$$

$$\text{又此处的 } v_1 = \frac{d^2}{d_1^2} v$$

$$\text{所以, } \Delta p_1 = \frac{1}{2} \rho \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 \frac{d^4}{d_1^4} v^2 = C_1 v^2 \quad (3-2)$$

$$\text{则 } C_1 = \frac{\rho}{2} \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 \frac{d^4}{d_1^4}$$

式中 Δp_1 ——流体在断面 1-1 处的压力损失, Pa;

ρ ——流体密度, kg/m³;

d_1 ——截面 1-1 腔室入口内径, m

d_2 ——截面 2-2 腔室内径, m;

d ——负压脉冲射流发生器入口内径, m;

v ——负压脉冲射流发生器入口液体流速, m/s;

ζ_1 ——局部阻力系数;

v_1 ——振荡腔入口液体流速, m/s;

v_2 ——振荡腔内液体流速, m/s;

(2) 流体在振荡腔中沿程压力损失

$$\text{雷诺数 } Re = \frac{vd}{\gamma} = \frac{4Q}{\pi d \gamma} = \frac{4 \times 540 \times 10^{-3} / 60}{3.14 \times 0.062 \times 10^{-6}} = 184000 > 2000$$

所以水在管中流动呈紊流状态

又装置是铸铁管，所以管表面的平均绝对粗糙度值 $\Delta = 1.0 \sim 1.5 \text{ mm}$

取 $\Delta = 1.2 \text{ mm}$

$$\text{所以 } \frac{\Delta}{d} = \frac{1.2}{62} = 0.019$$

$$\varepsilon = \frac{2\Delta}{d} = \frac{2 \times 1.2}{62} = 0.038$$

对应紊流的水力粗糙类有：

$$\frac{665 - 765 \lg \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{665 - 765 \lg 0.038}{0.038} = 16086$$

所以管中水力流动的雷诺数 $Re > 16086$

管中液体的流动属于水力粗糙类

由水力摩阻的经验公式得水力摩阻：

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{3.7d}{\Delta}\right)^2}$$

上式中 $d = d_2$

管路的沿程水头损失计算公式 $h_{f1} = \lambda \frac{L}{d} \frac{v_2^2}{2g}$ 得

$$\text{所以 } h_{f1} = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{3.7d}{\Delta}\right)^2} \times \frac{L_1}{d_2} \cdot \frac{v_2^2}{2g} \quad (3-3)$$

$$\text{即 } \Delta p_2 = \gamma h_{f1} \quad \Delta p_2 = \rho g h_{f1} = \rho g \cdot \frac{1}{\left(2 \lg \frac{3.7d}{\Delta}\right)^2} \times \frac{L_1}{d_2} \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\text{又此处速度 } v_2 = \frac{A}{A_2} \cdot v = \frac{d^2}{d_2^2} v$$

$$\Delta p_2 = \rho g \cdot \frac{1}{\left(2 \lg \frac{3.7d}{\Delta}\right)^2} \times \frac{L_1}{d_2} \cdot \frac{d^4}{d_2^5} v^2 = C_2 v^2 \quad (3-4)$$

$$\text{则 } C_2 = \rho g \cdot \frac{1}{\left(2 \lg \frac{3.7 d_2}{\Delta}\right)^2} \times \frac{L_1}{d_2^5} \cdot \frac{d^4}{2g}$$

式中 Δp_2 ——流体在振荡腔中的沿程压力损失, Pa;

Δ/d ——管表面的相对粗糙度;

Δ ——管表面的平均绝对粗糙度, mm;

d ——钢管内径, mm;

L_1 ——振荡腔室长度, mm。

(3) 流体在截面 3-3 的局部压力损失

对于突然缩小的局部水头损失没有现成的公式, 仿照突然扩大的局部水头损失推导如下:

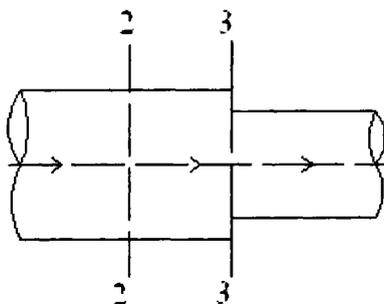


图 3-3 管路突然缩小

Fig3-3 Suddenly reduced pipeline

$$\text{由连续性方程 } \rho A_2 v_2 = \rho A_3 v_3 \Rightarrow v_2 = \frac{A_3}{A_2} v_3 \quad (3-5)$$

$$\text{再由动量方程: } p_2 A_2 - p_2 (A_2 - A_3) - p_3 A_3 = \rho Q (v_3 - v_2)$$

$$\Rightarrow (p_2 - p_3) A_3 = \rho Q (v_3 - v_2)$$

$$\Rightarrow (p_2 - p_3) = \rho v_3 (v_3 - v_2) \quad (3-6)$$

$$\text{根据能量方程得: } \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} + h_j \quad (3-7)$$

将式 (3-5)、(3-6) 代入式 (3-7) 得:

$$\begin{aligned}
 &= \frac{p_2 - p_3}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_3^2}{2g} = \frac{\rho v_3 (v_3 - v_2)}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_3^2}{2g} = \frac{v_3^2 - 2v_3 v_2 + v_2^2}{2g} \\
 &= \frac{(v_2 - v_3)^2}{2g} = \frac{(v_3 - v_2)^2}{2g}
 \end{aligned}$$

$$\text{即突然缩小的局部水头损失 } h_j = \frac{(v_2 - v_3)^2}{2g} \quad (3-8)$$

$$\begin{aligned}
 h_{j2} &= \frac{(v_2 - v_3)^2}{2g} = \frac{(1 - \frac{v_2}{v_3})^2 \cdot v_3^2}{2g} \\
 &= (1 - \frac{d_3^2}{d_2^2})^2 \cdot \frac{v_3^2}{2g}
 \end{aligned} \quad (3-9)$$

$$\text{又 } v_3 = \frac{d^2}{d_3^2} v$$

$$\Delta p_3 = \gamma h_{j2} = \frac{\rho}{2} \left(1 - \frac{d_3^2}{d_2^2}\right)^2 \frac{d^4}{d_3^4} v^2 = C_3 v^2 \quad (3-10)$$

$$\text{则 } C_3 = \frac{\rho}{2} \left(1 - \frac{d_3^2}{d_2^2}\right)^2 \frac{d^4}{d_3^4}$$

式中 Δp_3 —— 流体在振荡腔出口处压力损失, Pa;

v_3 —— 在振荡腔出口处液体流速, m/s;

d_3 —— 振荡腔出口内径, m。

(4) 流体在炮孔中的渗流

$$\text{由达西公式 } Q = \frac{K}{\mu} A \cdot \frac{\Delta p_i}{L_2} \Rightarrow \frac{Q}{A} = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\Delta p_i}{L_2} = v_{\text{渗流}}$$

$$\text{又 } v_{\text{渗流}} = \frac{d^2}{d_{\text{炮孔}}^2} v$$

$$\Delta p_4 = \Delta p_i = \frac{d^2}{d_{\text{炮孔}}^2} \cdot \frac{\mu L_2}{K} \cdot v = C_4 v \quad (3-11)$$

$$\text{则 } C_4 = \frac{d^2}{d_{\text{炮孔}}^2} \cdot \frac{\mu L_2}{K} = \frac{d^2}{d_3^2} \cdot \frac{\mu L_2}{K}$$

脉冲发生器上游的压力 p_1 与其位置的流体流速 v 的关系可推导如下：

表 3-1 工具压降与下游压力关系表

Table3-1 Relation of the upstream pressure and the downstream pressure

p_1 (Pa)	4×10^6	6×10^6	8×10^6	10×10^6
p_2 (Pa)	3.6×10^6	5.4×10^6	7.4×10^6	9.2×10^6

由以上实测数据可得： $p_2 = 0.93p_1 - 0.13 \times 10^6$

又对脉冲发生器上游和下游列能量方程得：

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_w \quad (3-12)$$

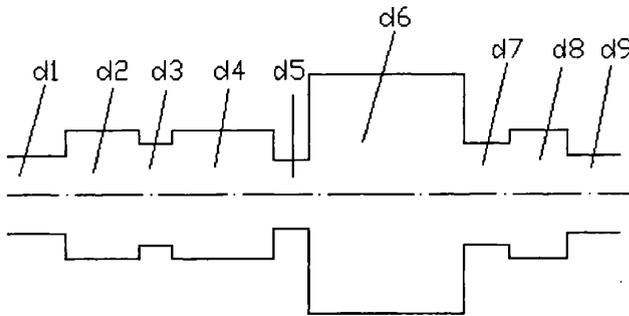


图 3-4 负压脉冲发生器内部结构图

Fig3-4 the inner structure of the negative pressure pulse jet modulator

其中： $d_1 = 45\text{mm}$, $d_2 = 75\text{mm}$, $d_3 = 60\text{mm}$, $d_4 = 75\text{mm}$, $d_5 = 40\text{mm}$, $d_6 = 140\text{mm}$,
 $d_7 = 60\text{mm}$, $d_8 = 75\text{mm}$, $d_9 = 45\text{mm}$

$$\text{局部水头损失 } h_{j1} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = \frac{(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2})v_1^2}{2g} = \frac{(1 - \frac{45^2}{75^2})v_1^2}{2g} = 0.64 \frac{v_1^2}{2g}$$

$$\text{同理： } h_{j2} = 0.04 \frac{v_1^2}{2g}, \quad h_{j3} = 0.11 \frac{v_1^2}{2g}, \quad h_{j4} = 1.16 \frac{v_1^2}{2g}, \quad h_{j5} = 1.48 \frac{v_1^2}{2g}, \quad h_{j6} = 0.26 \frac{v_1^2}{2g},$$

$$h_{j7} = 0.05 \frac{v_1^2}{2g}, \quad h_{j8} = 0.64 \frac{v_1^2}{2g}$$

所以 脉冲发生器内部的水头损失为 $h_w = \sum_{i=1}^8 h_{ji} = 4.38 \frac{v_1^2}{2g} = 2.19 \frac{v_1^2}{g} = 2.19 \frac{v^2}{g}$

将 $h_w = 2.19 \frac{v^2}{g}$ 和 $p_2 = 0.93p_1 - 0.13 \times 10^6$ 代入式 (3-12) 得:

$$0.07p_1 + 0.13 \times 10^6 = 2.19\rho v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{0.07p_1 + 0.13 \times 10^6}{2.19\rho}}$$

式中 L_2 ——炮孔长度, m ;

μ ——流体粘度, $mPa \cdot s$;

K ——炮孔中污染物的渗透率, μm^2 ;

h_{ji} ——负压脉冲发生器内部的各截面局部水头损耗, m 。

(5) 流体在模拟出水口处压力的损失

与截面 3-3 处的压力损失同理, 流体在出水口处压力的损失 Δp_5

$$\Delta p_5 = \frac{\rho}{2} \left(1 - \frac{d_0^2}{d_2^2} \right) \frac{d^4}{d_0^4} v^2 = C_5 v^2 \quad (3-13)$$

$$\text{则 } C_5 = \frac{\rho}{2} \left(1 - \frac{d_0^2}{d_2^2} \right) \frac{d^4}{d_0^4}$$

式中 d_0 ——振荡腔上的出水口直径, m 。

(6) 当流体流动为连续稳定流时, 炮孔尾段的压力表示为 $p_{\rho 1}$

$$p_{\rho 1} = p_1 - \Delta p_1 - \Delta p_2 - \Delta p_3 - \Delta p_4 - \Delta p_5 \quad (3-14)$$

将 Δp_1 、 Δp_2 、 Δp_3 、 Δp_4 、 Δp_5 以及 $v = \sqrt{\frac{0.07p_1 + 0.13 \times 10^6}{2.19\rho}}$ 代入式 (3-14) 并整理

得:

炮孔尾端压力:

$$p_{\rho 1} = p_1 - (C_1 + C_2 + C_3 + C_5) \cdot \frac{0.07p_1 + 0.13 \times 10^6}{2.19\rho} - C_4 \cdot \sqrt{\frac{0.07p_1 + 0.13 \times 10^6}{2.19\rho}} \quad (3-15)$$

3.2.2 脉冲发生器瞬间阻断时压力计算

由一元不稳定流对应的水击基本方程

$$\text{由水击连续性方程得: } -\frac{\partial v}{\partial s} = \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial s} \right) \quad (3-16)$$

$$\text{由水击运动方程得: } \frac{\partial}{\partial s} \left(z + \frac{p}{\gamma} \right) + \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g} + \frac{1}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial s} \right) = 0 \quad (3-17)$$

可近似认为 $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ 从而简化上述方程得:

$$-\frac{\partial v}{\partial s} = \frac{v}{c^2} \frac{\partial p}{\partial s}$$

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial s} = 0$$

联立上述方程解得:

$$\frac{\partial v}{\partial s} \left(\frac{v}{g} - \frac{1}{\gamma} \frac{c^2 \rho}{v} \right) = -\frac{\lambda v^2}{2Dg} \quad (3-18)$$

$$\frac{\partial p}{\partial s} \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{v^2}{c^2 \rho g} \right) = -\frac{\lambda v^2}{2Dg} \quad (3-19)$$

$$\text{由式 (3-18) 解得: } x = -\frac{2D}{\lambda} \left(\ln v + \frac{c^2}{2v^2} \right)$$

如果是取 v 减小方向为 x 轴正向, 则上式变为:

$$x = \frac{2D}{\lambda} \left(\ln v + \frac{c^2}{2v^2} \right) \quad (3-20)$$

$$\text{由式 (3-19) 解得: } p = -c\rho \ln v \quad (\text{负号代表产生的是负压}) \quad (3-21)$$

由式 (3-18) 分析得: 当 $x = L_1$ 时, 对应的速度为炮孔前端的流动速度, 此时

$$L_1 = \frac{2D}{\lambda} \left(\ln v + \frac{c^2}{2v^2} \right)$$

当流速 v 比较小时, $\ln v \ll \frac{c^2}{2v^2}$

$$L_1 = \frac{Dc^2}{\lambda v^2} \quad \text{即 } v = c \sqrt{\frac{D}{\lambda L_1}}$$

$$\text{又 } \frac{v_{\text{渗流}}}{v} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

$$v_{\text{渗流}} = \frac{d_1^2}{d_2^2} v$$

$$\text{由达西公式得: } \Delta p = v_{\text{渗流}} \cdot \frac{\mu L_2}{K} = \frac{d_1^2}{d_2^2} v \cdot \frac{\mu L_2}{K} = \frac{\mu L_2}{K} \frac{d_1^2}{d_2^2} c \sqrt{\frac{D}{\lambda L_1}} \quad (3-22)$$

其中 $\lambda = \frac{1}{(2 \lg \frac{3.7d}{\Delta})^2}$, 又水击波在管中的传播速度 c 的求法如下:

由《工程流体力学》查表^[29]的: $E = 2.06 \times 10^9, E_0 = 9.8 \times 10^{10}$

又 $D = 62 \text{mm}, e = 5 \text{mm}$, 水的密度 $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$

$$\text{则 } c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.06 \times 10^9}{1000}} = 1435 \text{m/s}$$

水击波的传播速度:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \frac{D}{e} \cdot \frac{E}{E_0}}} = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{D}{e} \cdot \frac{E}{E_0}}}$$

将 $\lambda = \frac{1}{(2 \lg \frac{3.7d}{\Delta})^2}, c = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{D}{e} \cdot \frac{E}{E_0}}}$ 代入式 (3-20) 整理后得:

$$\Delta p = \sqrt{(2 \lg \frac{3.7d}{\Delta})^2 \cdot d_2 \cdot \frac{1}{L_1} \cdot \frac{d_2^2}{d_3^2} \cdot \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{D}{e} \cdot \frac{E}{E_0}}} \cdot \frac{\mu L_2}{K}} = C_6 \cdot \frac{\mu L_2}{K} \quad (3-23)$$

$$\text{则 } C_6 = (2 \lg \frac{3.7d}{\Delta}) \sqrt{\frac{d_2}{L_1} \cdot \frac{d_2^2}{d_3^2} \cdot \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{D}{e} \cdot \frac{E}{E_0}}}} = (2 \lg \frac{3.7d_2}{\Delta}) \sqrt{\frac{d_2}{L_1} \cdot \frac{d_2^2}{d_3^2} \cdot \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{D}{e} \cdot \frac{E}{E_0}}}}$$

所以, 流动为一元不稳定流动时, 炮孔尾端的压力为 p_{p2}

$$p_{p2} = -c \rho \ln v - C_6 \cdot \frac{\mu L_2}{K}$$

再将 $v = c \sqrt{\frac{D}{\lambda L_1}}$ 代入上式得:

$$p_{p2} = -\frac{1425\rho}{\sqrt{1+\frac{d_2}{e}\cdot\frac{E}{E_0}}}\ln\frac{1425}{\sqrt{1+\frac{d_2}{e}\cdot\frac{E}{E_0}}}\cdot(2\lg\frac{3.7d_2}{\Delta})\sqrt{\frac{d_2}{L_1}}-C_6\cdot\frac{\mu L_2}{K} \quad (3-24)$$

$$\text{则 } C_6 = (2\lg\frac{3.7d_2}{\Delta})\sqrt{\frac{d_2}{L_1}}\cdot\frac{d_2^2}{d_3^2}\cdot\frac{1425}{\sqrt{1+\frac{D}{e}\cdot\frac{E}{E_0}}}$$

式中 e ——钢管壁厚, m ;

E ——水的弹性系数, Pa ;

E_0 ——钢管的弹性系数, Pa ;

d_2 ——钢管内径, m 。

3.2.3 炮孔尾端负压脉冲幅值

最后, 炮孔尾端的压力幅值 $A = p_{p1} - p_{p2}$

将式 (3-13)、(3-22) 代入上式得:

$$A = p_1 - (C_1 + C_2 + C_3 + C_5) \cdot \frac{0.07p_1 + 0.13 \times 10^6}{2.19\rho} - C_4 \cdot \sqrt{\frac{0.07p_1 + 0.13 \times 10^6}{2.19\rho}} + \frac{1425\rho}{\sqrt{1+\frac{d_2}{e}\cdot\frac{E}{E_0}}}\ln\frac{1425}{\sqrt{1+\frac{d_2}{e}\cdot\frac{E}{E_0}}}\cdot(2\lg\frac{3.7d_2}{\Delta})\sqrt{\frac{d_2}{L_1}} + C_6 \cdot \frac{\mu L_2}{K} \quad (3-25)$$

$$\text{式中 } C_1 = \frac{\rho}{2} \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2 \frac{d^4}{d_1^4},$$

$$C_2 = \rho g \cdot \frac{1}{\left(2\lg\frac{3.7d_2}{\Delta}\right)^2} \times \frac{L_1}{d_2^5} \cdot \frac{d^4}{2g}$$

$$C_3 = \frac{\rho}{2} \left(1 - \frac{d_3^2}{d_2^2}\right)^2 \frac{d^4}{d_3^4},$$

$$C_4 = \frac{d^2}{d_3^2} \cdot \frac{\mu L_2}{K}$$

$$C_5 = \frac{\rho}{2} \left(1 - \frac{d_0^2}{d_2^2}\right)^2 \frac{d^4}{d_0^4},$$

$$C_6 = (2\lg\frac{3.7d_2}{\Delta})\sqrt{\frac{d_2}{L_1}}\cdot\frac{d_2^2}{d_3^2}\cdot\frac{1425}{\sqrt{1+\frac{D}{e}\cdot\frac{E}{E_0}}}$$

3.2.4 负压脉冲幅值分析

从式 (3-25) 中可以看出, 炮孔尾端的压力幅值是工具压降 p_1 , 振荡腔体积, 模拟

炮孔深度 L_1 和模拟炮孔堵塞物渗透率 K 间的函数关系式。我们利用单因素法分析负压脉冲幅值与各参数的关系。

(1) 脉冲幅值 A 与工具压降 P_1 之间的关系

取 $L_1 = 0.5m$, $L_2 = 0.6m$, $K = 2 \times 10^{-14} m^2$, $\rho = 1000kg/m^3$, $c = 1279m/s$,
 $\mu = 1.005 \times 10^{-3} Pa \cdot s$, $d_1 = 0.02m$, $d_2 = 0.062m$, $d_3 = 0.05m$, $d = 0.045m$

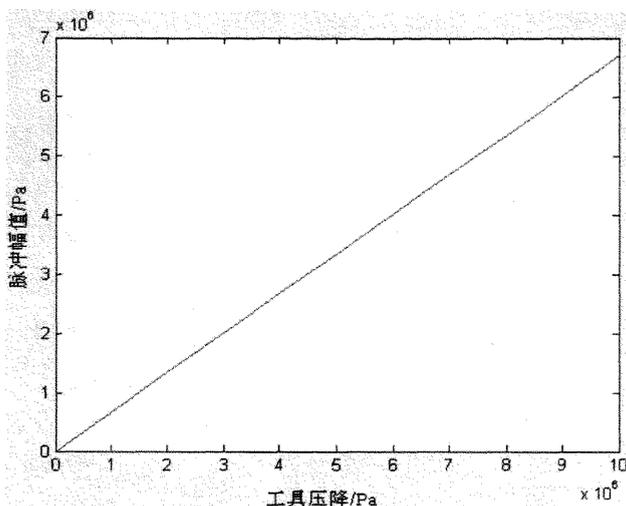


图 3-5 工具压降对脉冲幅值影响关系图

Fig3-5 The relationship of the negative pulse amplitude and tool differential pressure

从图 3-5 可以看出^[30]，压力脉冲幅值随着工具压降的增大而增大。从而在现场我们可以通过增大泵压来提高压力脉冲幅值，从而提高负压脉冲射流的冲蚀清洗效果。

工具压降越大，泵提供给流体的压力越大，就提供给流体的能量就越大。虽然经过沿程能量的消耗，但由于流速增加导致的增加的消耗的能量不及增加的能量。所以，最终传递到炮孔尾段的能量就多，。即压力就大，相应脉冲幅值就大。

(2) 脉冲幅值与振荡腔体积之间的关系

取 $p_1 = 5 \times 10^6 Pa$, $L_2 = 0.6m$, $K = 2 \times 10^{-14} m^2$, $\rho = 1000kg/m^3$, $c = 1279m/s$,
 $\mu = 1.005 \times 10^{-3} Pa \cdot s$, $d_1 = 0.02m$, $d_2 = 0.062m$, $d_3 = 0.05m$, $d = 0.045m$

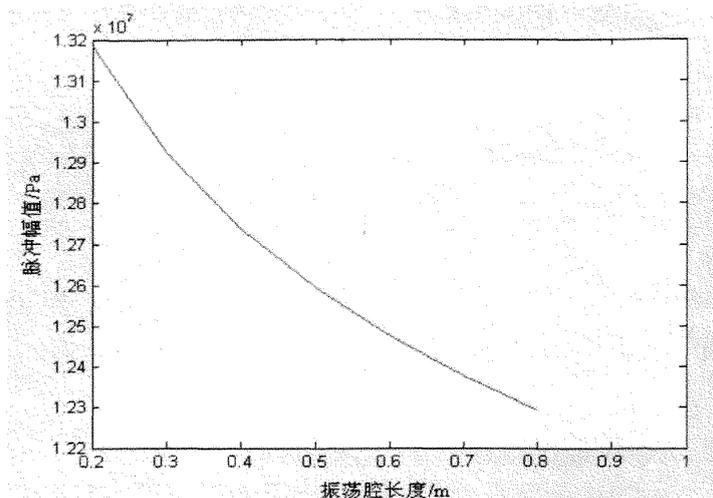


图 3-6 振荡腔长度对脉冲幅值影响关系图

Fig3-6 Relationship of the negative pulse amplitude and oscillate chamber length

从图 3-6 可以看出，压力脉冲幅值随着振荡腔长度的增加，脉冲幅值减小。由于腔室直径不变，而长度增加，实际上就是增加了振荡腔的体积，也就是脉冲幅值随着振荡腔体积的增加而减小。

随着振荡腔体积的增加，上游传播来的液流能量衰减增大，所以传递到炮孔尾段的能量相应减小。即压力脉冲幅值随着振荡腔体积的增加而相应减小。

(3) 脉冲幅值与模拟炮孔深度之间的关系

取 $p_1 = 5 \times 10^6 \text{ Pa}$, $L_1 = 0.5 \text{ m}$, $K = 2 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $c = 1279 \text{ m/s}$,
 $\mu = 1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $d_1 = 0.02 \text{ m}$, $d_2 = 0.062 \text{ m}$, $d_3 = 0.05 \text{ m}$, $d = 0.045 \text{ m}$

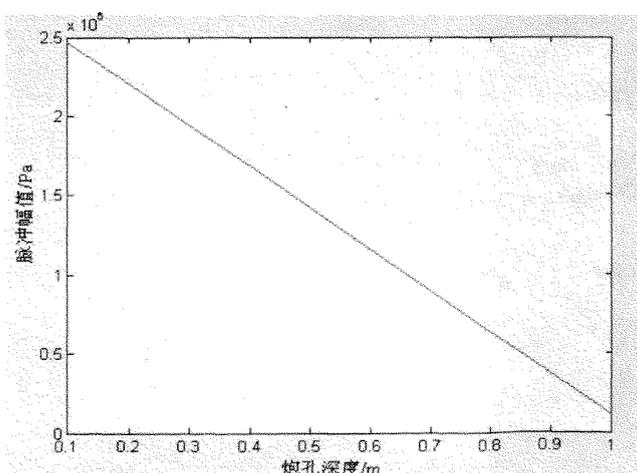


图 3-7 模拟炮孔深度对脉冲幅值影响关系图

Fig3-7 Relationship of the negative pulse amplitude and sand pipe depth

从图 3-7 可以看出，压力脉冲幅值随着炮孔深度的增加而减小。当炮孔深度超过 1m 时，压力脉冲幅值就已经减弱的比较小的值。从而作用效果相应减弱。

由于随着炮孔深度的增加，上游来流能量衰减相应增加，炮孔深度越大，能量损耗的就越多。最后传递到炮孔尾段的能量就少。即炮孔尾段的压力脉冲幅值随着炮孔深度的增加而减小。

(4) 脉冲幅值与模拟堵塞物渗透率之间的关系

取 $p_1 = 5 \times 10^6 \text{ Pa}$, $L_1 = 0.5 \text{ m}$, $L_2 = 0.6 \text{ m}$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $c = 1279 \text{ m/s}$,
 $\mu = 1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $d_1 = 0.02 \text{ m}$, $d_2 = 0.062 \text{ m}$, $d_3 = 0.05 \text{ m}$, $d = 0.045 \text{ m}$

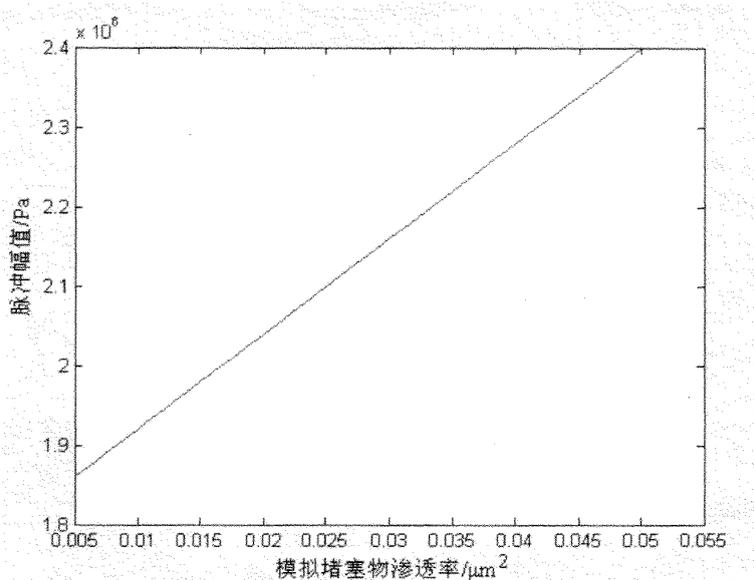


图 3-8 模拟堵塞物渗透率对脉冲幅值影响关系图

Fig3-8 Relation of the negative pulse amplitude and block permeability

从图 3-8 可以看出，随着炮孔内填砂渗透率的增加而压力脉冲幅值增加，也可以理解为砂粒粒径的变化导致渗透率的变化。也就是随着砂粒粒径的增加，相应渗透率增加，而脉冲幅值相应增加。

随着砂粒粒径的增加，流体在通过炮孔时沿程阻力相应减小，沿程压力损失就小，从而传递到炮孔尾段的压力增大，相应的压力脉冲幅值增大。

3.3 负压脉冲幅值与负压脉冲发生器结构和水力参数的关系

通过负压脉冲发生器产生的负压脉冲射流，其负压脉冲幅值大小直接影响到我们清

洗产层油流通道（炮孔）的效果。研究各参数包括脉冲发生器的结构设计参数和工作水力参数对负压脉冲幅值的影响规律。

产生负压脉冲射流的发生器的振荡腔长度和腔径是影响负压脉冲幅值的重要参数，同时，在有围压的情况下，负压脉冲幅值的衰减的衰减程度增加。这些参数对负压脉冲射流幅值的影响规律对我们研究负压脉冲射流是很重要的。下面将对负压脉冲射流分成常压淹没条件和围压条件来进行研究。最终寻找规律，从而对负压脉冲发生器进行改良提供指导意义。

3.3.1 常压淹没条件下的负压脉冲幅值

负压脉冲幅值：

$$\begin{aligned} A &= p_1 - \Delta p_1 - \Delta p_2 = p_1 - \gamma \cdot \lambda \frac{L v^2}{d 2g} - \gamma h_j - \frac{0.05 \rho_d Q^2}{C^2 A_0^2} \\ &= p_1 - \gamma \cdot \lambda \frac{L v^2}{d 2g} - \gamma h_j - \frac{0.081 \rho_d Q^2}{C^2 d_{ne}^4} \end{aligned} \quad (3-26)$$

式中 $\Delta p_1 = \gamma \cdot \lambda \frac{L v^2}{d 2g} + \gamma h_j$, $\Delta p_2 = \frac{0.05 \rho_d Q^2}{C^2 A_0^2} = \frac{0.081 \rho_d Q^2}{C^2 d_{ne}^4}$

$$d_{ne} = \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}$$

式中 p_1 表示脉冲发生器工具压降， Δp_1 表示脉冲发生器压力损耗， Δp_2 表示钻头压降。

从以上公式中可以看出，在常压淹没条件下负压脉冲幅值与脉冲发生器的压力损耗增大而减小，随钻头压降^[31]的增大而减小。

为了获得较大的脉冲幅值：

1) 可以降低钻头压降。为了达到这一目的，我们可以采用流量系数高的喷嘴，或者增加喷嘴直径和喷嘴个数。

2) 可以降低脉冲发生器的压力损耗。为了达到这一目的，我们可以采用减小发生器的腔室体积或者降低发生器内部的局部水头损失。而变化腔室的体积可以通过改变腔室的长度和腔径。

(1) 脉冲发生器内腔长度和负压脉冲幅值关系

取 $p_1=5\text{MPa}$, $\lambda=0.048$, $C=0.9$, $d_{ne}=0.002\text{cm}$, $d=0.14\text{m}$

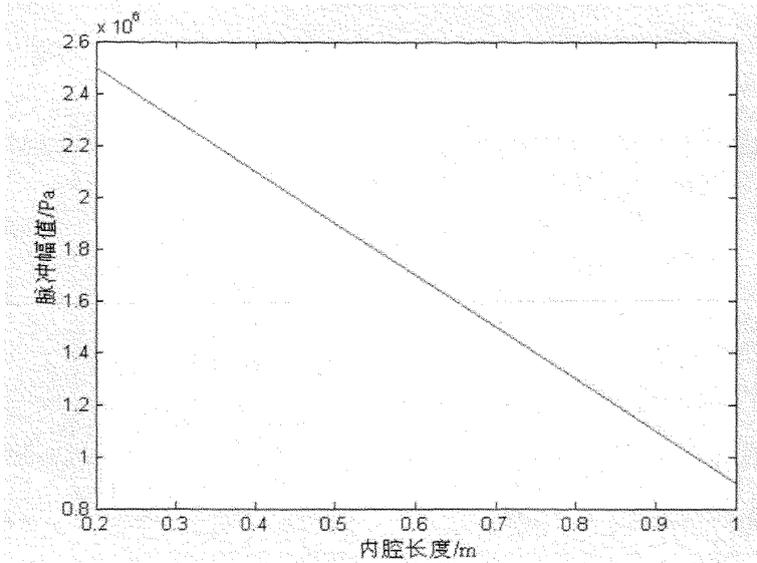


图 3-9 脉冲发生器内腔长度对脉冲幅值影响关系图

Fig3-9 Relation of amplitude of pulse and inner chamber length

从图 3-9 可以看出，脉冲发生器的内腔长度是影响负压脉冲幅值的重要因素，随着负压脉冲发生器内腔长度的增加，负压脉冲幅值减小。

在内腔腔径不变的情况下，内腔长度增加意味着内腔体积增加。从而沿程能量损耗增加，从而发生器尾段压力减小，从而在上游液体来流阻断压力为零时的负压脉冲幅值减小。即随着振荡腔体积的增加，负压脉冲幅值减小。

(2) 脉冲发生器腔径和负压脉冲幅值关系

取 $p_1=5\text{MPa}$, $\lambda=0.048$, $C=0.9$, $d_{ne}=0.002\text{cm}$, $d=0.14\text{m}$

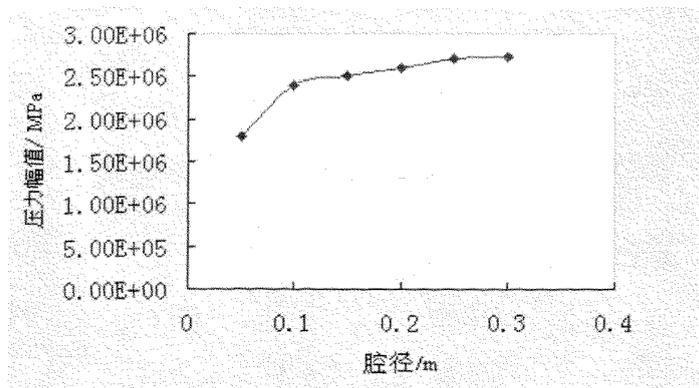


图 3-10 脉冲发生器腔径对脉冲幅值影响关系图

Fig3-10 Relation of the negative pulse amplitude and inner chamber dia

从图 3-10 可以看出，随着负压脉冲发生器腔径的增加，负压脉冲幅值

加。腔径开始变化对负压脉冲幅值影响明显，后来随着腔径的增加，对负压脉冲幅值影响逐渐减弱。

随着负压脉冲发生器的腔径的增加，液体流动中能量损耗逐渐减小，从而尾段负压脉冲幅值增大。从而获得比较好的负压脉冲效果。

3.3.2 围压条件下的负压脉冲幅值

负压脉冲幅值：

$$A = p_1 - \Delta p_1 - \Delta p_2 - p_{\text{围压}} = p_1 - \lambda \frac{L v^2}{d 2g} - \frac{0.05 \rho_d Q^2}{C^2 A_0^2} - p_{\text{围压}} = p_1 - \lambda \frac{L v^2}{d 2g} - \frac{0.081 \rho_d Q^2}{C^2 d_{nc}^4} - p_{\text{围压}} \quad (3-27)$$

从式 (3-27) 中可以看出，在围压条件下负压脉冲幅值与脉冲发生器的压力损耗增大而减小，随钻头压降的增大而减小。随着围压的增加负压脉冲射流幅值减小。

(1) 围压条件下围压和负压脉冲幅值关系

取 $p_1 = 5\text{MPa}$ ， $\lambda = 0.048$ ， $C = 0.9$ ， $d_{nc} = 0.002\text{cm}$ ， $d = 0.14\text{m}$ ， $L = 0.3\text{m}$

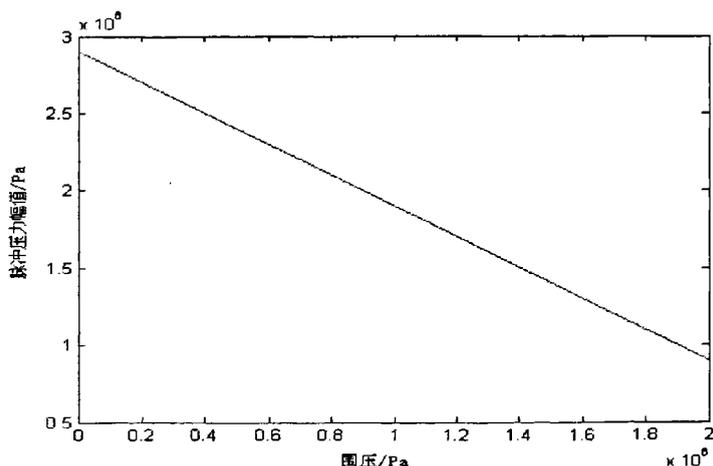


图 3-11 围压条件下围压对脉冲幅值影响关系图

Fig3-11 Relation of the negative pulse amplitude and confining pressure

从图 3-11 可以看出，围压条件下围压削弱了负压脉冲的幅值。围压越大，负压脉冲射流的幅值越小。这里围压是模拟的地下井深。井深越深，围压越大。通过图 3-11 说明随着井深的增加，负压脉冲幅值减弱。

负压脉冲在进入有围压的环境下，围压消耗了传播中的负压脉冲波的能量，从而导致负压脉冲波减弱，这是因为围压使得负压脉冲波的振荡效果减弱。围压越大，这种削弱作用就越强，因此围压越大，负压脉冲幅值越小。

3.4 本章小结

根据负压脉冲射流洗井工作原理，对负压脉冲发生器连通和阻断情况下的压力分别进行计算，最终给出了负压脉冲幅值的数学公式，对影响负压脉冲幅值的各个参数进行研究，得到以下结论：

- (1) 负压脉冲幅值随脉冲发生器工具压降的的增大而增大；
- (2) 负压脉冲幅值随着振荡腔体积的增大而减小；
- (3) 负压脉冲幅值随着炮孔深度的增加而减小；
- (4) 负压脉冲幅值随着炮孔填砂渗透率的增加而增大。

通过在常压淹没条件下和围压条件下，对负压脉冲发生器射流流动情况建立数学公式。对影响负压脉冲射流幅值的各个参数的进行研究，得到以下结论：

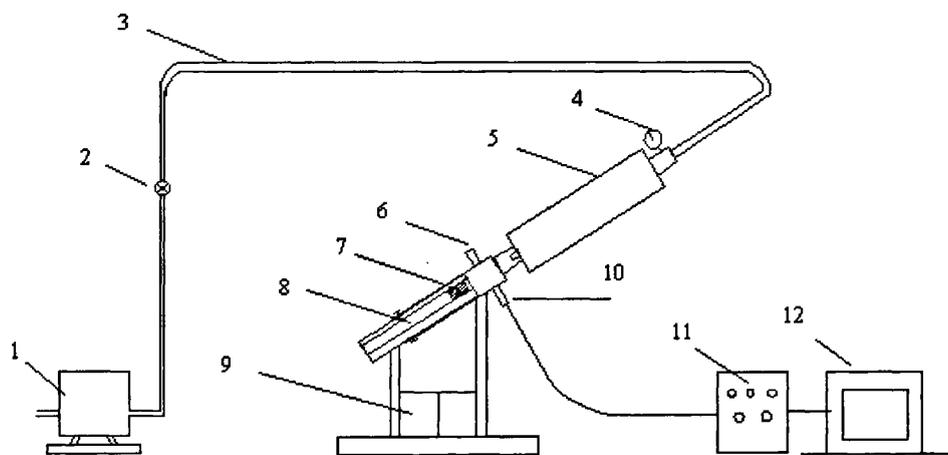
- (1) 负压脉冲幅值随着脉冲发生器内腔体积的增加而减小；
- (2) 负压脉冲幅值随着脉冲发生器振动腔直径的增加而增加；
- (3) 负压脉冲幅值随着围压的增大而减小；
- (4) 可以采用流量系数高的喷嘴，或者增加喷嘴直径和喷嘴个数从而获得较大的负压脉冲幅值；
- (5) 可以采用降低发生器内部的局部水头损失和通过同时减小腔室的长度和增大腔径。从而获得较大的负压脉冲幅值。

第四章 负压脉冲射流清洗炮孔堵塞物机理模拟实验

本实验用低强度岩样来模拟井下炮孔堵塞物，通过实验研究负压脉冲射流对岩样作用前后的强度和渗透率的变化，来评价负压脉冲射流清洗炮孔堵塞的作用效果。

4.1 实验系统

实验是在中国石油大学（华东）高压水射流研究中心进行的，实验系统主要包括五部分：高压供水系统、自振阀式负压脉冲射流调制器、模拟炮孔装置、数据采集与分析系统和压力表。



1—高压泵 2—调压阀 3—高压管线 4—压力表 5—负压脉冲发生器 6—回水阀 7—岩样
8—模拟炮孔装置 9—支撑架 10—传感器 11—B&K 声压测试仪 12—计算机

图 4-1 负压脉冲射流洗井模拟实验系统图

Fig4-1 Experimental diagram about negative pressure pulse jet washing well

实验过程中，高压水由高压泵流出后经过高压管线进入负压脉冲调制器，在进入前由压力表测得其水流压力。水流在脉冲调制器中调制成负压脉冲射流，经过连接管线后进入模拟炮孔装置。传感器布置在模拟炮孔装置的尾端，可以测得射流的脉冲压力波动，传送至计算机数据采集处理系统。实验通过调压阀调节排水量以控制脉冲射流调制器的入口压力。实验系统见图 4-1。

(1) 高压供水系统：高压泵、供水水箱、调压阀、高压管线。

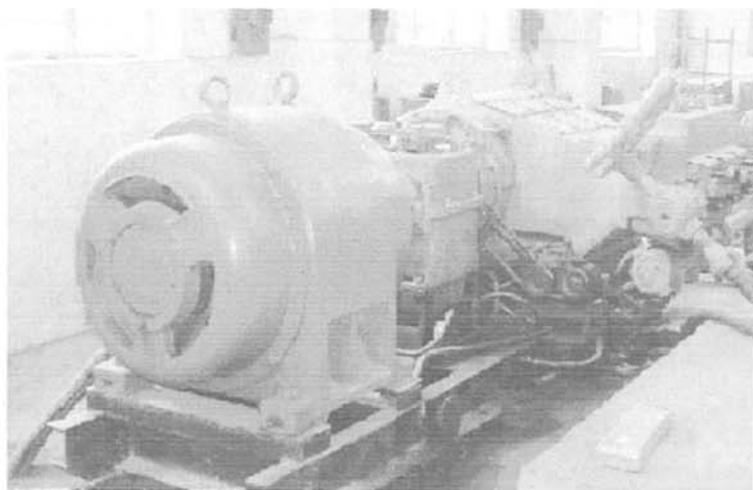


图 4-2 YLC500 型撬装泵

Fig4-2 Type YLC500 high pressure pump

①高压泵是高压射流的能量源，实验中使用的是兰州石油机械厂生产的三缸柱塞高压泵，其型号为 YLC500 型撬装泵。主要性能指标见表（4-1）及表（4-2）。

表 4-1 撬装泵性能

Table4-1 Character of the high pressure pump

最大压力	50MPa	冲程	120mm
最大排量	510L/min	冲次	401C/M
外形尺寸	3800x1600x1300mm	整车重量	5400kg

表 4-2 撬装泵压力—排量

Table4-2 Pressure-displacement of high pressure pump

档位	1	2	3	4
压力/MPa	50	25.4	19.2	13.4
排量/L/min	160	240	350	510

②供水水箱：具有一定的水位差保证高压泵的上水效率，容积 3m^3 。

③高压管线：采用沈阳生产的高压管线，其型号为 Q/SXS J 02 722 4D-32-32 型。

（2）压力表：量程 $0\sim 40\text{MPa}$ ，是无锡市特种压力表有限公司制造。安装在自振阀式负压脉冲射流调制器入口处，测量其位置处的压力。

（3）数据采集与分析系统：B&K 噪声测量系统和传感器。

①B&K 声压测试系统：实验采用丹麦制造的 B&K 声压测试系统，量程为 $0\sim 100\text{kHz}$ 。

图 4-3 是数据采集和分析软件的主界面，通过该软件可以对数据采集程序采集下来的数

据进行各种详尽的分析。该软件主要功能有：调用所有数据采集程序采集下来的数据文件并回放波形图；显示采集数据的具体时间；可以选取显示的数据长度；可以分通道显示每一个传感器采集下来的数据；可以对数据进行各种滤波，消除背景噪声的影响等。

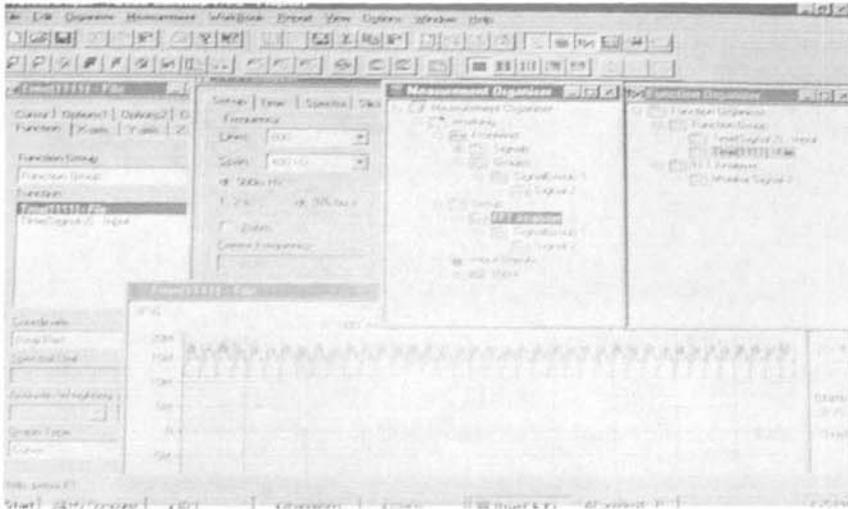


图 4-3 数据采集和分析软件的主界面

Fig4-3 Main interface of data collection and analytic software

②压力传感器：采用的是瑞士 KELLER 公司生产的 PA-23/400bar/846.1 型高精度、高频响压阻式压力传感器。其量程范围为 0~60MPa，频响 1kHz，输入电压 8-28VDC，输出电压 1000~5000mV，测量精度为 0.21%FS。

(4) 负压脉冲射流调制器是高压水射流研究中心根据机械振荡阻断法调制射流的原理，采用无弹簧式的双阀体结构自行研制的自振阀式负压脉冲射流调制器。

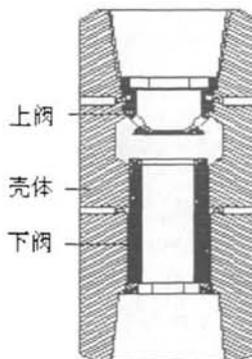


图 4-4 调制器示意图

Fig4-4 Sketch map of modulator

该调制器的基本原理是在调制器内部安装两个特殊的阀体（如图 4-4），在钻井液压

力的作用下，通过上、下阀体往复振动，周期性的阻断调制器内部钻井液的流动，达到下游产生脉动负压的目的。

在调制器工作前，上、下阀在自重的作用下，分别位于各自下滞点的位置，并且相互不接触，此时调制器内部流道打开，当钻井液进入调制器时，顺序经过上、下阀，最后到达钻头。当建立钻头压降后，作用在阀体上、下密封面上的压力基本一致。由于上阀的上受力面积小于其下受力面积，使得作用在上阀下受力面上的液压力大于作用在其上受力面上的液压力，因此，上阀在向上的综合液压力作用下开始上行（图 4-5-①），直至上行到其上滞点停止。同理，下阀也在液压力作用下开始上行，当下阀与上阀接触时（图 4-5-②），瞬间阻断调制器内部钻井液的流动，此时下阀下部腔室内的钻井液在惯性作用下继续流动，使得下阀下游及井底钻头周围空间内产生强大的水击压力，形成脉动负压。上、下阀关闭时，上阀上部腔室内的压力升高，上、下阀则在上阀上部腔室内总液压力作用下共同下行（图 4-5-③），当到达上阀下滞点时，上阀停止运动，下阀在惯性的作用下继续下行，此时上、下阀分离（图 4-5-④），流道打开，钻井液流向钻头。上、下阀分离后，由于上阀上下受力面积的差异，使得上阀在分开后又在液压力的作用下上行；当下阀下行至其速度为零时，在液压力作用下也开始上行。至此，负压脉冲射流调制器完成一次振动周期。

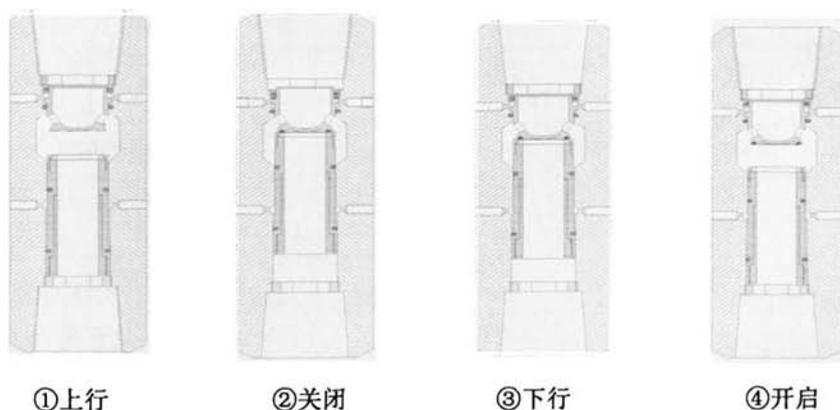


图 4-5 自振阀式负压脉冲射流调制器工作原理图

Fig4-5 Concept picture of self-vibration valve negative pressure pulse jet

(5) 模拟炮孔装置

为了模拟井下炮孔，设计了一套模拟装置如图（4-6），该装置包括振荡腔和炮孔两部分。此套装置主要用来模拟各种条件的变化对产生的脉冲幅值的影响规律，这些条件包括振荡腔腔室大小、砂粒直径大小、炮孔深度、不同工具压降分别是模拟代表地下上

下接头中间振荡空间大小，地层污染程度，脉冲射流对污染层的作用深度，不同的供液压力大小。

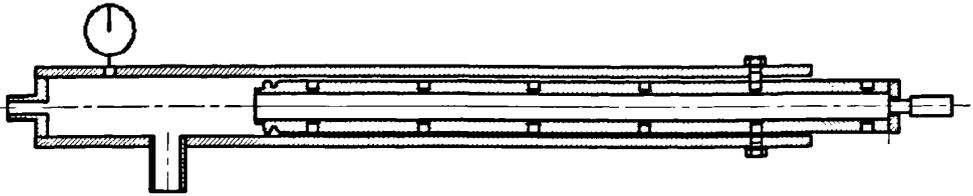


图 4-6 模拟炮孔装置

Fig4-6 Simulation perforation device

图 4-6 是模拟炮孔装置的结构图，其主要由两部分组成，即炮孔模拟装置的内部结构和炮孔模拟装置的外部结构两部分。分别模拟模拟振荡腔和模拟炮孔。模拟炮孔在本文中也称炮孔装置。

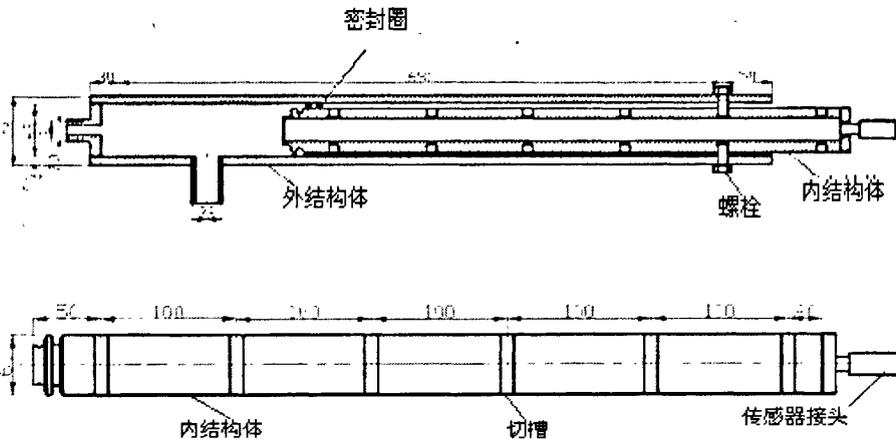


图 4-7 模拟炮孔装置设计图

Fig4-7 Designing picture of simulate perforation device

如图 4-7 上图所示，模拟装置的模拟振荡腔与模拟炮孔装置之间是通过四个螺栓卡入炮孔结构的切槽中固定的，其主要作用就是控制模拟装置的内部结构，防止其在高压作用下从外结构体中喷出。图 4-7 下图为炮孔模拟装置的炮孔结构图，其上刻有 6 个槽，用来控制炮孔结构的深度。从而模拟炮孔深度。振荡腔与炮孔结构之间是由的 $\phi 56 \times 3.5$ 型号的 3 个密封圈密封，并润有黄油来润滑。

其中压力表是测围压大小的，围压大小是通过振荡腔的下端接调压阀控制的，炮孔前端捆细砂网，是为了防止实验在装不同粒径砂子时砂子随脉冲射流流出炮孔并堵塞传感器造成信号丢失。炮孔外边缘加工了五个槽，是用来和螺栓一起固定炮孔，炮孔和振荡腔共同承受腔室内的压力。炮孔尾端接传感器与 B&K 声压测试系统与计算机相连接，

用来传输调制的负压脉冲射流在装置尾端产生的脉冲信号。

(6) 人造岩样

实验采用人造低强度混凝土岩样来模拟炮孔堵塞物，配料为直径 0.3mm~0.6mm 的石英砂和建筑水泥。岩样的制备方法如下：

(1) 分别按灰砂比 1: 1、1: 2 和 1: 3 将水泥和石英砂混合，搅拌均匀。

(2) 加水后再将形成的砂浆搅拌均匀，静置五分钟后置入直径为 25mm、长度为 60mm 的圆柱管中。

(3) 在常温下避免日光照晒候凝固结，保存一周左右即可用来进行冲洗实验。

经保养一周后测得其抗压强度为如表 4-3 所示，实验所制作岩样如图 4-8 所示。

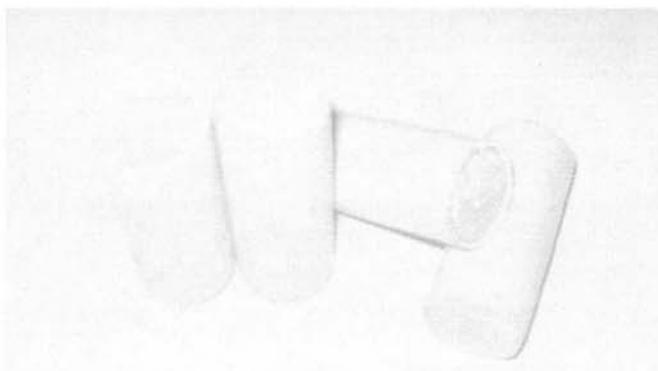


图 4-8 实验所用岩样图

Fig4-8 Concrete sample used in the experiments

另外，图 4-9 和图 4-10 是液压万能试验机和渗透率测试仪，分别用于对岩样进行强度和渗透率测试。



图 4-9 液压式万能试验机

Fig4-9 Hydraulic pressure universal testing machine

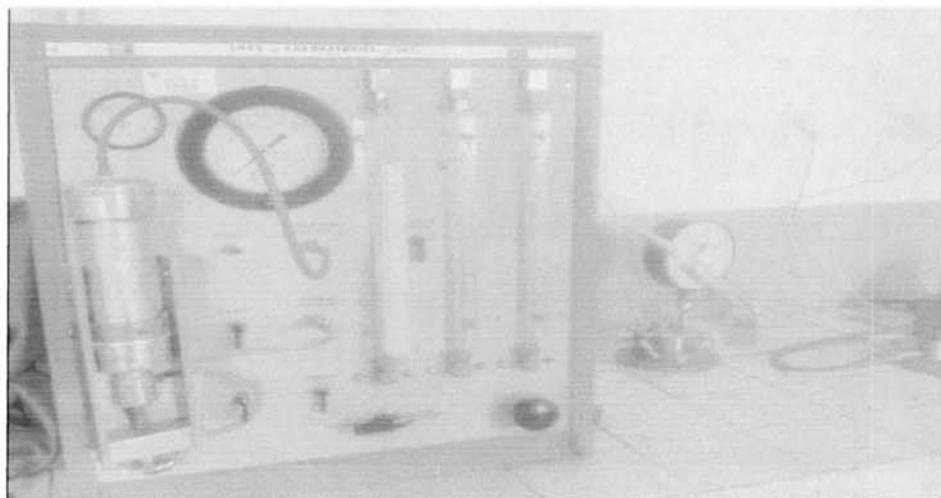


图 4-10 渗透率测试仪

Fig4-10 Apparatus for permeability survey

下列注意事项是在实验过程中根据遇到的问题总结出的：

①我们要把清洗后的岩样放在烘箱里烘干 24 小时后方可拿去测量其渗透率。否则测得的渗透率不准确。

②注意渗透率仪的使用方法，在旋转按钮调节水银柱和水柱过程中要随时注意观察液面的变化，当液面升高异常迅速时，要快速将仪器右边的按钮掰直。目的为了防止水银和水柱冲出玻璃直管，造成对仪器的损害。

4.2 实验步骤

实验步骤如下：

- (1) 按照负压脉冲射流洗井模拟原理图组装实验装置。
- (2) 检查各装置的连接情况，将进水阀调至最大端。
- (3) 启动高压泵，待负压脉冲调制器振动后，调节进水阀，达到预定的排量和压力。
- (4) 启动 B&K 声压测试系统，通过传感器测试模拟炮孔装置中负压脉冲发生装置喷嘴下游压力的波动。
- (5) 在一定的压力值下冲击岩样一定的时间后停泵取出岩样做好标记待测渗透率。
- (6) 确定下一组实验参数，重复以上 2~5 步，进行下一个实验。
- (7) 将所有做过实验的岩样统一标记后，在烘箱内烘干 24 小时。然后取出，将

烘干的岩样送渗透率实验室对其进行渗透率的测量。

(8) 将岩样分类, 在液压式万能试验机上进行压碎实验。

负压脉冲水力波冲击岩样模拟洗井注意事项:

- (1) 保证负压脉冲调制器振动起来, 如果不振动可以用大锤敲击调制器, 如果还不振动, 可将调制器拆开打抹上油后重装即可。保证调制器振动起来。从而产生负压脉冲波。
- (2) 岩样的放置位置应该保证其处在最佳冲击效果位置, 尽可能的离脉冲发生器喷嘴距离最近, 从而使调制器的冲击效果达到最好。
- (3) 岩样在测其渗透率时, 应该保证在用烘箱对岩样烘干 24 小时之后, 再对岩样进行空气法测量渗透率。

4.3 实验结果与分析

为了研究负压脉冲射流的洗井机理, 进行了负压脉冲射流对岩样清洗前后抗压强度变化的实验研究, 以及负压脉冲射流参数对岩样渗透率影响的实验研究, 并进行了负压脉冲射流和脉冲射流对岩样清洗效果的实验研究。

4.3.1 负压脉冲射流对岩样强度的影响

通过进行负压脉冲射流对岩样作用前后在液压式万能试验机做抗压实验, 得出负压脉冲对岩样强度的变化, 岩样模拟堵塞物, 堵塞物的抗压强度下降, 则更容易破碎随液流流入井筒而排出。实验研究了负压脉冲射流在振荡腔体积为 $3.07 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, 模拟炮孔深度为 20mm, 模拟圆形出水口直径为 25mm, 清洗时间为 20min, 工具压降分别为 1MPa, 2MPa, 3MPa 条件下对模拟不同污染程度的 1#岩样, 2#岩样, 3#岩样的渗透率的变化影响规律。表 4-3、表 4-4、表 4-5 和表 4-6 分别是不同工具压降下的岩样抗压强度数据。

表 4-3 原始岩样抗压强度实验数据

Table4-3 Compressive strength of the original concrete sample

岩样类型 \ 抗压强度	NO.1 抗压强度/MPa	NO.2 抗压强度/MPa	NO.3 抗压强度/MPa	岩样抗压强度均值/MPa
1#岩样	6.6	7.0	6.8	6.8
2#岩样	3.9	4.3	4.1	4.1
3#岩样	2.8	2.5	2.3	2.5

表 4-4 工具压降 1MPa 的负压脉冲波处理后岩样抗压强度实验数据

Table4-4 Compressive strength of the concrete samples treated with negative pressure pulse jet when the tool differential pressure is 1MPa

岩样类型 \ 抗压强度	NO. 1 抗压强度/MPa	NO. 2 抗压强度/MPa	NO. 3 抗压强度/MPa	岩样抗压强度均值/MPa
1#岩样	5.7	6.0	5.8	5.8
2#岩样	3.0	3.4	2.8	3.1
3#岩样	2.0	2.1	1.9	2.0

表 4-5 工具压降 2MPa 的负压脉冲波处理后岩样抗压强度实验数据

Table4-5 Compressive strength of the concrete samples treated with negative pressure pulse jet when the tool differential pressure is 2MPa

岩样类型 \ 抗压强度	NO. 1 抗压强度/MPa	NO. 2 抗压强度/MPa	NO. 3 抗压强度/MPa	岩样抗压强度均值/MPa
1#岩样	5.4	5.7	5.6	5.5
2#岩样	2.9	3.0	2.8	2.9
3#岩样	2.1	2.0	1.9	1.9

表 4-6 工具压降 3MPa 的负压脉冲波处理后岩样抗压强度实验数据

Table4-6 Compressive strength of the concrete samples treated with negative pressure pulse jet when the tool differential pressure is 3MPa

岩样类型 \ 抗压强度	NO. 1 抗压强度/MPa	NO. 2 抗压强度/MPa	NO. 3 抗压强度/MPa	岩样抗压强度均值 (MPa)
1#岩样	5.1	5.2	5.3	5.2
2#岩样	2.8	2.4	2.9	2.7
3#岩样	1.8	1.6	1.9	1.8

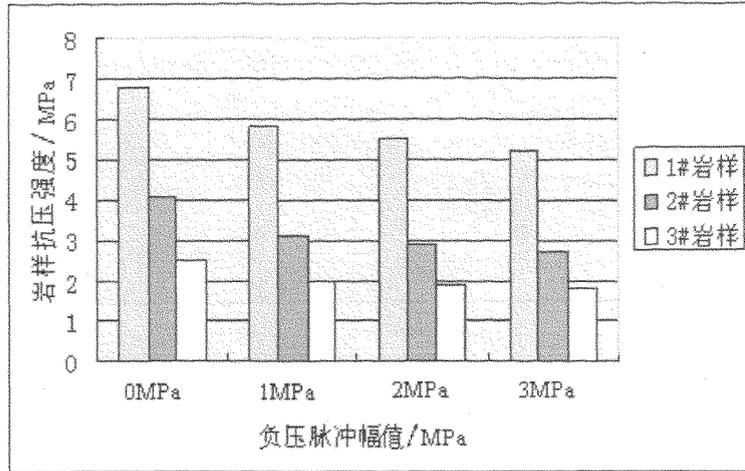


图 4-11 负压脉冲射流幅值对岩样抗压强度影响关系图
 Fig 4-11 The relationship of negative pressure jet amplitude and Compressive strength of the samples

从以上数据表 4-3、表 4-4、表 4-5 和表 4-6 以及图 4-11 可以看出，1#岩样，2#人造岩样，3#人造岩样的经过负压脉冲波冲击处理后抗压强度下降，并且随着所冲击岩样的负压脉冲射流幅值的增大，岩样的抗压强度下降程度也随之增大。

这主要是由于负压脉冲波的脉冲压力值是在一定范围内有规律的变化了的，人造岩样在一定的负压脉冲水力波作用后，容易导致疲劳强度破坏，可使岩样形成网状微裂缝和少量宏观裂缝。在负压脉冲的交变应力下岩样的断裂强度明显降低，最大应力值要低于静载作用下的抗拉强度。

所以，负压脉冲导致人造岩样强度的下降，人造岩样是模拟的地层污染物，污染物强度下降了导致其更容易破碎随射液流排出井筒，从而从抗压强度说明了负压脉冲射流的洗井机理。

4.3.2 负压脉冲射流参数对岩样渗透率的影响

通过实验分析负压脉冲射流的幅值和作用时间对岩样渗透率的影响，找出负压脉冲幅值和冲击时间等因素对油井清洗效果的规律。

(1) 幅值对岩样渗透率的影响规律

实验研究了负压脉冲射流在振荡腔体积为 $3.07 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，模拟炮孔深度为 20mm，模拟圆形出水口直径为 25mm，负压脉冲幅值分别为 1MPa，2MPa，3MPa 条件下对模拟不同污染程度的 1#岩样，2#岩样，3#岩样的渗透率的变化影响规律。表 4-7 为不同负压脉冲幅值条件下对岩样渗透率影响的实验数据表。其具体实验数据见附录 1 中的序

号为 4—12 的岩样数据。

表 4-7 脉冲射流幅值对岩样渗透率影响数据表

Table4-7 The effect of the negative pressure pulse amplitude on the permeability of the concrete samples

岩样类型 \ 负压脉冲幅值	1MPa	2MPa	3MPa
1#岩样	2.7%	4.9%	7.1%
2#岩样	4.0%	5.9%	8.4%
3#岩样	4.7%	7.9%	9.8%

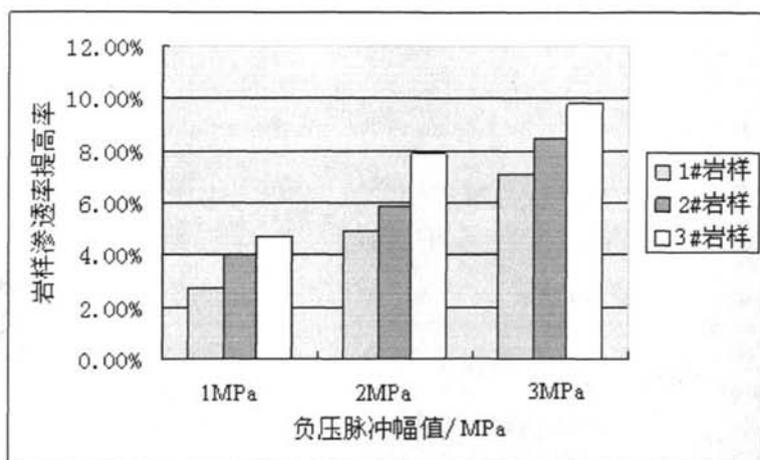


图 4-12 负压脉冲幅值与渗透率提高率的关系图

Fig4-12 The relationship of the negative pressure pulse amplitude and the permeability improved ratio

由图 4-12 可以看出，随着负压脉冲幅值的增大，岩样的渗透率也随着提高，而且可以看出负压脉冲射流对高渗透率岩样要比低渗透率岩样的作用效果好。

随着负压脉冲射流幅值的增大，被冲击的岩样就会产生更多的微裂缝，液体通过岩石的表面张力也会下降，这使得液体通过岩样的渗流阻力减小，从而通过岩样的液体量大大增加。当脉冲产生的负压反复作用于油层，岩石在交变压力下发生破坏时，最大应力值一般低于静荷载作用下岩石的抗拉强度。疲劳效应下造成的微裂缝。继续承受交变压力时，会使原裂缝扩展、微裂缝扩展。这样在近井地带，由于负压的不断产生，将造成若干微裂缝，从而提高地层的渗透率，改善其渗流性能。

(2) 脉冲射流作用时间对岩样渗透率的影响

实验研究了负压脉冲射流在振荡腔体积为 $3.07 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，模拟炮孔深度为 20mm，模

拟圆形出水口直径为 25mm，负压脉冲射流对岩样的清洗时间分别为 10min，20min，30min 条件下 1#岩样，2#岩样，3#岩样的渗透率的变化影响规律。表 4-8 为不同负压脉冲射流对岩样的清洗时间条件下对岩样渗透率影响的实验数据表。数据见附录 1 中的序号为 13—21 岩样数据。

表 4-8 脉冲射流作用时间对岩样渗透率影响数据表

Table4-8 Data sheet on the relation of rock core permeability and working time negative pressure pulse jet

作用时间 岩样类型	10 分钟	20 分钟	30 分钟
1#岩样	7.1%	8.0%	9.4%
2#岩样	8.4%	10.2%	11.1%
3#岩样	9.8%	14.1%	16.5%

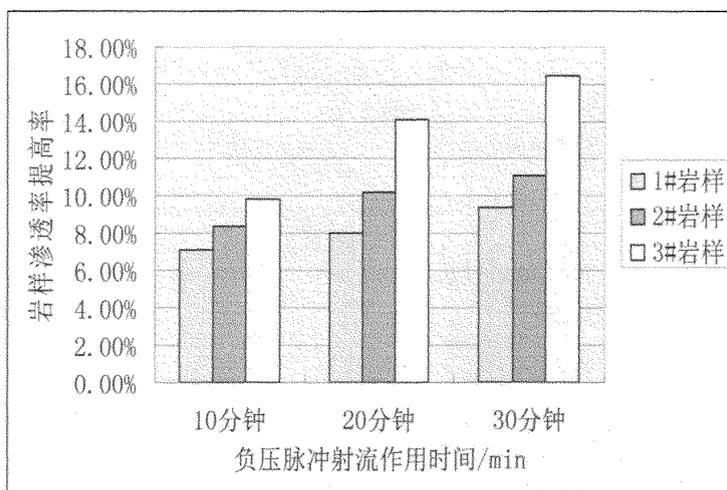


图 4-13 负压脉冲作用时间与渗透率提高率的关系图

Fig4-13 Curve on the relation of enhance rate and working time of negative pressure pulse jet

由图 4-13 可以看出负压脉冲幅值作用时间越长，负压脉冲射流的作用效果越好。越有利于岩样渗透率的提高。而且地层渗透率越低，为了达到和低渗透地层相同的清洗效果，负压脉冲射流需要作用更长的时间。

随着负压脉冲作用时间的延长，负压脉冲射流对实验用人造岩样的冲击作用导致岩样的疲劳破坏，随着时间的增长，这种疲劳破坏范围程度加大，导致人造岩样抗压强度的下降，所以在负压脉冲射流产生的交变应力作用下，人造岩样受破坏的程度也就越大，

岩样中强度低的内部物质破碎成微小颗粒从负压脉冲射流从孔隙中流出,而且随着射流作用时间的延长,破碎产生的微裂缝越多,以及原有的裂缝会不断的延伸扩展。所以最终结果是随着负压脉冲作用时间的延长,人造岩心的渗透率提高率增大,从而增加了清洗效果,更好的改善了地层的渗透率。

4.3.3 负压脉冲射流与脉冲射流清洗效果的对比实验

通过对比实验,在相同的条件下,负压脉冲射流对岩样的渗透率提高率和脉冲射流的相比较,从而发现负压脉冲射流负压作用对渗透率提高的贡献。实验研究了在振荡腔体积为 $3.07 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,模拟炮孔深度为 20mm,模拟圆形出水口直径为 25mm,负压脉冲射流对岩样的清洗时间分别为 20min 条件下 1#岩样,2#岩样,3#岩样的渗透率的变化影响规律。表 4-8 为不同工具压降条件下负压脉冲射流和脉冲射流对岩样渗透率影响的对比实验数据表。实验数据见附录 1 中序号为 1—3、22—30、4—12 岩样数据。

表 4-9 工具压降 1MPa 的负压脉冲射流和脉冲射流清洗岩样渗透率数据表

Table4-9 The permeability comparison of the concrete samples treated with the negative pressure pulse jet that the tool differential pressure is 1MPa and pulse jet

岩样类型 \ 岩样渗透率	1#岩样	2#岩样	3#岩样
原始岩样渗透率/mD	12.019	24.815	134.247
脉冲射流清洗岩样渗透率/mD	12.166	25.144	136.393
负压脉冲射流清洗岩样渗透率/mD	12.344	25.812	140.6

表 4-10 工具压降 2MPa 的负压脉冲射流和脉冲射流清洗岩样渗透率数据表

Table4-10 the permeability comparison of the concrete samples treated with the negative pressure pulse jet that the tool differential pressure is 2MPa and pulse jet

岩样类型 \ 岩样渗透率	1#岩样	2#岩样	3#岩样
原始岩样渗透率/mD	12.019	24.815	134.247
脉冲射流清洗岩样渗透率/mD	12.434	25.859	139.494
负压脉冲射流清洗岩样渗透率/mD	12.613	26.284	144.955

表 4-11 工具压降 3MPa 的负压脉冲射流和脉冲射流清洗岩样渗透率数据表
 Table4-11 the permeability comparison of the concrete samples treated with the negative pressure pulse jet that the tool differential pressure is 3MPa and pulse jet

岩样类型	1#岩样	2#岩样	3#岩样
原始岩样渗透率/mD	12.019	24.815	134.247
脉冲射流清洗岩样渗透率/mD	12.698	26.14	143.072
负压脉冲射流清洗岩样渗透率/mD	12.867	26.859	147.368

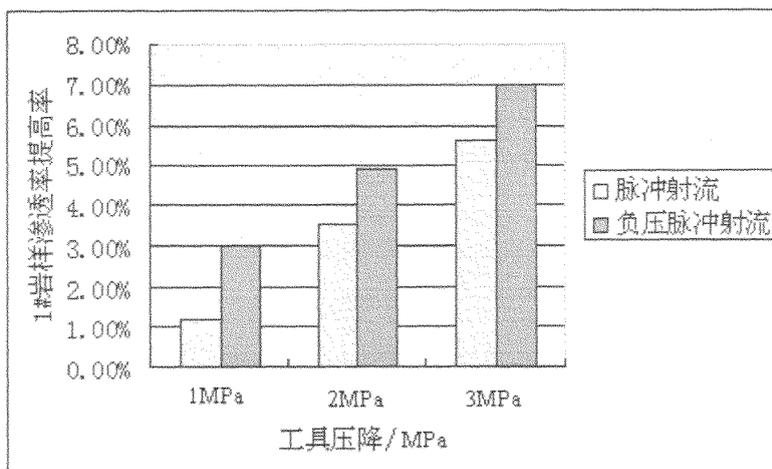


图 4-14 工具压降与岩样渗透率提高率的关系图

Fig4-14 the relationship of the tool differential pressure and the permeability improved ratio

从表 4-9、表 4-10 和表 4-11 以及图 4-14 可以看出负压脉冲射流对低强度人造岩样的清洗效果要比无负压效果的脉冲射流要好，而且通过对比 3 种人造岩样的渗透率提高率幅度，还可以看出达到相同的清洗效果，对低渗透地层负压脉冲射流的清洗时间要比高渗透地层的清洗时间要长。而且随着负压脉冲幅值的增大，负压脉冲对岩样的清洗效果越好。

由于被圈闭的流体在负压作用下，可以迅速地冲向井腔，从而使射孔部分的孔道堵塞物，在瞬间负压的作用下，促使挤入油流通道中的介质更轻易流入井筒，继而排到地面，从而达到净化渗流通道，解除孔眼堵塞的目的。在负压的诱导作用下，油层中的流体迅速流至井底，把油层和井壁上的杂质携带至井筒，进而流到地面，从而解除了井壁污染，疏通了井壁周围油层的孔隙孔道，改善了渗流状况，提高了油层的渗流性，有利

于流体渗滤，达到最终提高油井产量的目的。

4.4 本章小节

本章采用低强度的岩样来模拟井下炮孔堵塞物，通过实验研究了负压脉冲射流对岩样作用前后的强度和渗透率的变化，来评价负压脉冲射流清洗炮孔堵塞、提高炮孔渗透率的作用效果。所得结论如下：

- (1) 负压脉冲冲击可有效降低岩样强度；
- (2) 负压脉冲射流的负压对于提高岩样渗透率非常有利；
- (3) 脉冲幅值越大，对岩样的清洗效果越好；
- (4) 脉冲射流作用的时间越长，对岩样的清洗效果越好；岩样渗透率越低，需要的清洗时间越长。

第五章 负压脉冲射流清洗炮孔特性及压力波衰减实验

本章通过负压脉冲射流清洗炮孔特性实验，研究工具压降和振荡腔体积对负压脉冲幅值的影响规律。以及压力波在炮孔中的衰减实验，来评价负压脉冲射流清洗炮孔的有效性。

5.1 实验目的与实验设备

实验为了研究振荡腔腔室的大小、工具压降以及模拟炮孔内填充的不同粒径的砂子等因素对负压脉冲幅值的影响，采用 100kHz 的 B&K 声压测试系统测量喷嘴下游模拟炮孔装置尾端的脉动压力波形。本文实验中的模拟炮孔装置包括振荡腔和炮孔两部分组成，实验原理见图 5-1 所示。

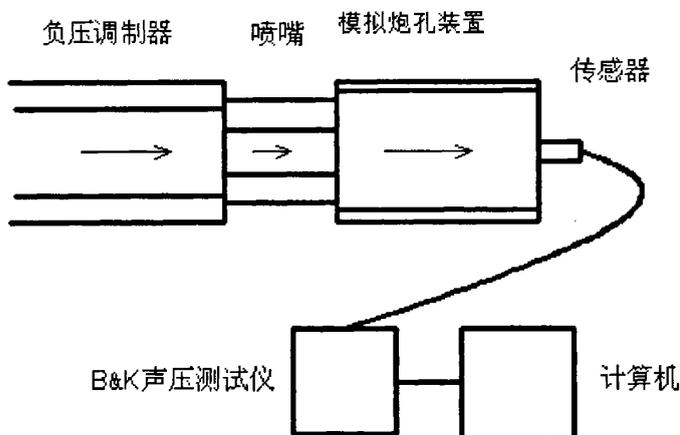


图 5-1 实验原理图

Fig5-1 The experimental setup

测量原理：基于自振阀式负压脉冲射流调制器工作原理的分析得出，当上、下阀关闭时，上游来流中断，下阀腔室内的液体在惯性作用下继续流动，使得腔室内的压力值降低；当上、下阀开启时，液体进入下阀腔室，使得腔室内的压力值升高。负压脉冲调制器中的压力变化在穿过一段振荡腔后将导致模拟炮孔装置的尾端的压力变化，因此利用压力传感器可以测量模拟炮孔装置中尾端压力幅值的变化，输入计算机后以波形图的形式显示，根据波形的变化特点确定脉动压力的波动范围。

实验所使用的设备与负压脉冲射流清洗炮孔堵塞机理实验中的相同。

5.2 实验步骤和注意事项

- (1) 脉动负压洗井模拟实验步骤如下：
- (2) 按照调制器负压脉冲洗井模拟试验系统图组装实验装置；
- (3) 检查各装置的连接情况，打开调压阀；
- (4) 启动高压泵，待调制器振动后，调节调压阀，达到预定的排量和压力；
- (5) 启动 B&K 声压测试系统，通过传感器测试下喷嘴下游压力的波动；
- (6) 停泵；
- (7) 确定下一组实验参数，重复以上 2~5 步，进行下一个实验。

下列注意事项是在实验过程中根据遇到的问题总结出的：

- (1) 下阀的初始位置应该在下位；
- (2) 上阀阻力和行程要小和短；
- (3) 上下阀的共同下行是由流量决定的，必须克服两阀因面积差向上的推力。排量不变，增加压力时，下阀回升太快或者行程太短。排量增加，下阀行程加长，但防止过长。

5.3 工况条件对负压脉冲幅值的影响

排量 $Q=160\text{L}/\text{min}$ 、入口压力 $P=4.5\text{MPa}$ 条件下，实验测量得到的炮孔尾端压力波动波形如图 (5-2)。其他参数条件下的实验测量波形图见附录 2—炮孔尾端实验波形图。

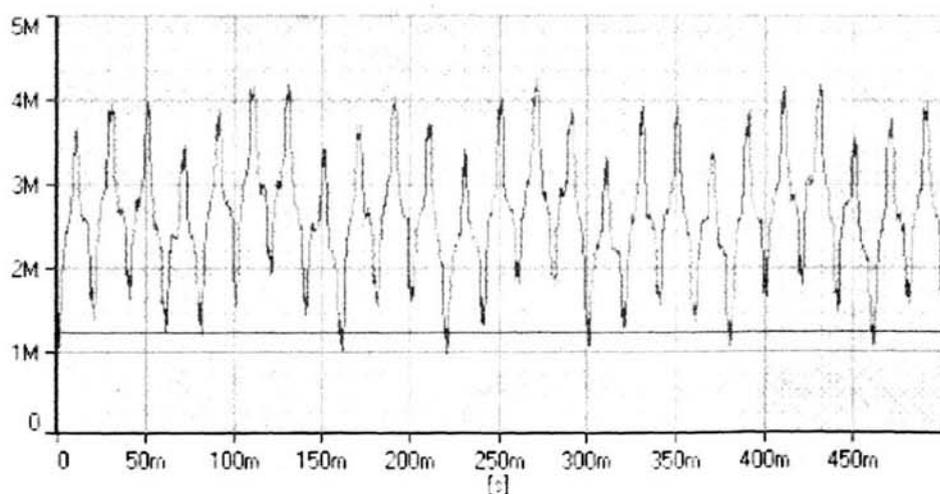


图 5-2 炮孔尾端波形图

Fig5-2 Pulse map of the end of the shot hole.

为了研究负压脉冲射流清洗炮孔的特性和射流在炮孔中的衰减规律，进行了负压脉冲射流不同工况条件下负压脉冲的影响规律的实验，该实验工况条件包括工具压降和振荡腔体积。具体实验数据见附录 2。

5.3.1 工具压降对负压脉冲幅值的影响

实验研究了在模拟炮孔深度为 22cm，模拟圆形出水口直径为 25mm，模拟污染物的炮孔填砂粒径为 0.22-0.6mm 条件下，负压脉冲幅值随振荡腔体积和工具压降的变化规律。表 5-1 是工具压降与负压脉冲幅值的关系数据表。

表 5-1 工具压降与脉冲幅值的关系数据表

Table5-1 The relationship between the tool differential pressure and the pulse amplitude

腔室体积 工具压降	2.091 /10 ⁻³ ×m ³	2.483 /10 ⁻³ ×m ³	2.875 /10 ⁻³ ×m ³
2.7/MPa	2.2	2.0	1.6
3.2/MPa	2.6	2.3	1.8
3.7/MPa	2.7	2.4	1.9
4.2/MPa	2.8	2.6	1.9

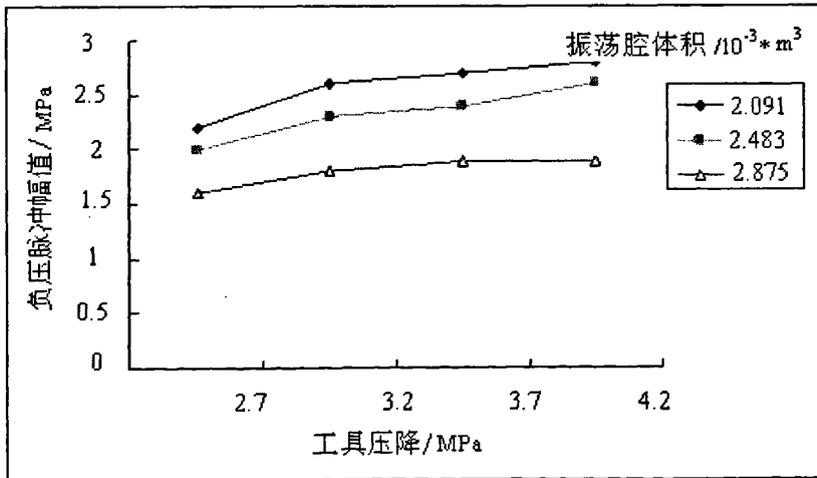


图 5-3 工具压降大小对负压脉冲幅值的影响关系图

Fig5-3 The relationship between the tool differential pressure and the pulse amplitude

从图 5-3 可以看出，负压脉冲幅值随着工具压降的增大而增大，而且可以看出在相同的工具压降的条件下，振荡腔体积越小，负压脉冲幅值越大。

在该实验情况下，工具压降大就意味着泵压大，则提供给流体的能量就越大。虽然

经过沿程能量的消耗，但是最终传递到炮孔尾段的能量越大，经过振荡腔室之后的流体振荡的能量就越大，振荡就越剧烈，虽然振荡剧烈，能量消耗也随之增加，但与提供的能量相比，腔室内某处的能量还是增大的。所以，工具压降越大，产生的负压脉冲幅值就越大。在现场工具压降和泵压是相关的，通过实验可以看出来，泵压越大，负压脉冲发生器产生的负压脉冲幅值就越大。

5.3.2 振荡腔体积对脉冲幅值的影响

实验研究了在模拟炮孔深度为 22cm，模拟圆形出水口直径为 25mm，模拟污染物的炮孔填砂粒径为 0.22-0.6mm 条件下，相同的工具压降条件下负压脉冲幅值随振荡腔体积的变化规律。表 5-2 是振荡腔体积与负压脉冲幅值的关系数据表。

表 5-2 振荡腔体积与负压脉冲幅值关系数据表

Table5-2 The relation of The amplitude of negative pressure pulse and the volume of the oscillate chamber

工具压降 振荡腔体积	2.7/MPa	3.7/MPa	4.2/MPa
$2.287/10^{-3} \times m^3$	2.1	2.5	2.7
$2.483/10^{-3} \times m^3$	2.0	2.4	2.6
$2.679/10^{-3} \times m^3$	1.8	2.2	2.3
$3.071/10^{-3} \times m^3$	1.4	1.8	1.8

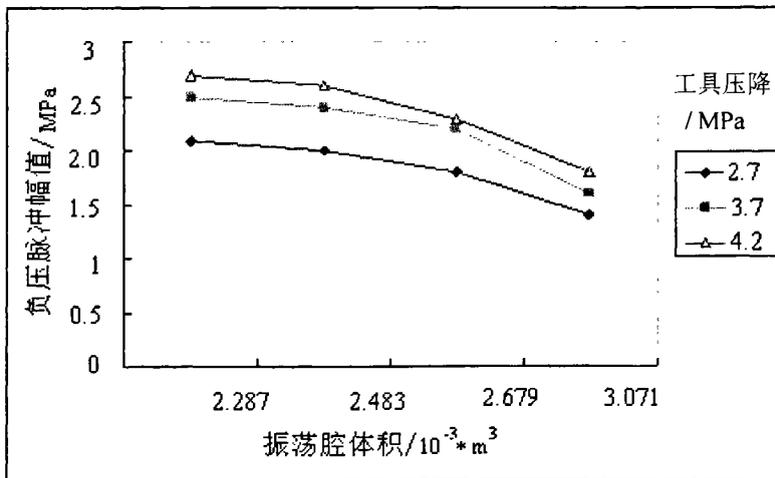


图 5-4 振荡腔体积对负压脉冲幅值的影响关系图

Fig5-4 The relation of pulse amplitude and volume

由图 5-4 可以看出，脉冲幅值在一定范围内，随着振荡腔体积的增大而减小，当振

荡腔体积小，射流在振荡腔内剧烈振荡，能量损失严重，所以脉冲负值大。当振荡腔体积小增大时，射流在振荡腔内剧烈减弱，能量损失相应下降，所以脉冲负值小。

负压脉冲波当振荡腔体积缩小时振荡幅值越大，从而对堵塞地层的作用强度越大，解堵效果越好。所以我们在井下可以减小上下封隔装置和炮孔间区域的空间体积，以期望获得最佳的负压脉冲射流对产层的解堵效果。

5.4 炮孔内负压脉冲压力波的传播衰减

为了研究负压脉冲射流在模拟炮孔中的传播衰减规律，进行了炮孔内堵塞与不堵塞的比较实验，炮孔内不同的堵塞颗粒粒径对负压脉冲幅值影响规律实验和模拟不同炮孔深度处的负压脉冲作用效果实验。

5.4.1 炮孔内堵塞与不堵塞脉冲幅值的比较

实验在振荡腔体积为 $3.07 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，模拟圆形出水口直径为 25mm，炮孔填砂粒径为 0.22-0.6mm，负压工具压降是 5MPa 条件下进行的。实验为了研究对比炮孔内堵塞与不堵塞负压脉冲幅值的差异。表 5-3 是炮孔内填砂和不填砂对比关系表。

表 5-3 填砂和不填砂对比关系数据表

Table5-3 The relation of sand Shothole and no sand shothole

炮孔深度 \ 脉冲幅值	20/mm	120/mm	220/mm	320/mm	420/mm	520/mm
填砂脉冲值/MPa	1.8	1.5	1.1	0.9	0.8	0.7
不填砂脉冲值/MPa	2.9	2.5	2.2	1.7	1.5	1.1

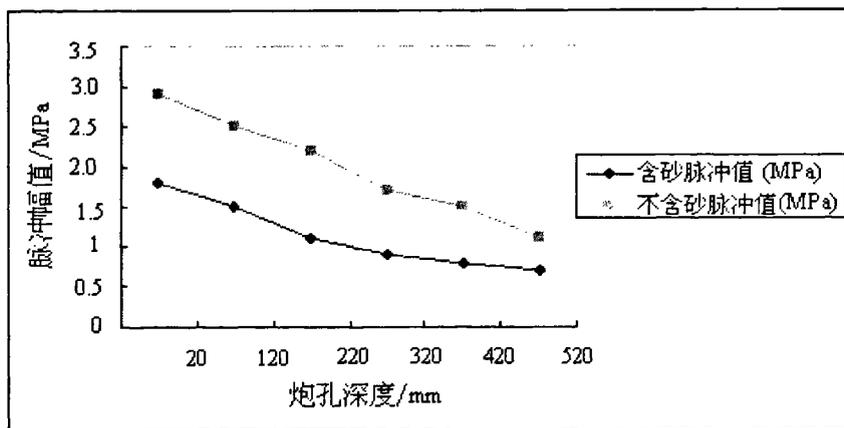


图 5-5 填砂对脉冲幅值影响关系图

Fig5-5 The relation of sand Shothole and no sand Shothole

由图 5-5 可以看出, 负压脉冲幅在通过有填砂的炮孔和没有填砂的炮孔做比较, 前者有明显的幅值衰减。

由于不论从能量角度分析还是从功的角度分析, 波的能量与波动振幅的平方成正比, 即 $E \propto A^2$ 。这一结论可以从很多文献^[32]中的得知。该结论适用于各种波, 包括本文研究的水力负压脉冲波。又负压脉冲波在含砂介质中传播时, 由于沿途砂介质的阻碍作用, 波动能量传递给介质^[33], 介质得到能量振动疏松, 而这必然导致波传播能量的衰减, 从而脉冲波动振幅相应降低。而脉冲波在模拟射孔孔腔中传播时, 能量衰减相对较少, 故波动振幅就相对比较大。而且随着传播深度的增加, 沿途能量损失不断增加, 当传播到一定深度后, 能量衰减完毕。所以, 随着深度的增加, 能量不断衰减, 相应的脉冲波的振幅不断减小。

5.4.2 炮孔内颗粒粒径对负压脉冲幅值的影响

实验研究了在模拟炮孔深度为 22cm, 模拟圆形出水口直径为 25mm, 振荡腔体积为 $3.07 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 条件下, 负压脉冲幅值随模拟堵塞物颗粒粒径影响规律。表 5-4 是炮孔内颗粒粒径与负压脉冲幅值影响关系数据表。

表 5-4 颗粒粒径与负压脉冲幅值关系数据表
Table5-4 The relation of particle size and peak of pulse

粒径 工具压降	0.15-0.2 /mm	0.2-0.22 /mm	0.22-0.6 /mm	0.6-0.8 /mm	0.8-0.9 /mm	0.9-1.25 /mm
3.0/MPa	0.3	0.4	0.5	0.8	0.9	1.0
3.5/MPa	0.4	0.5	0.6	0.9	1.1	1.2
4.0/MPa	0.5	0.6	0.7	1.1	1.3	1.4

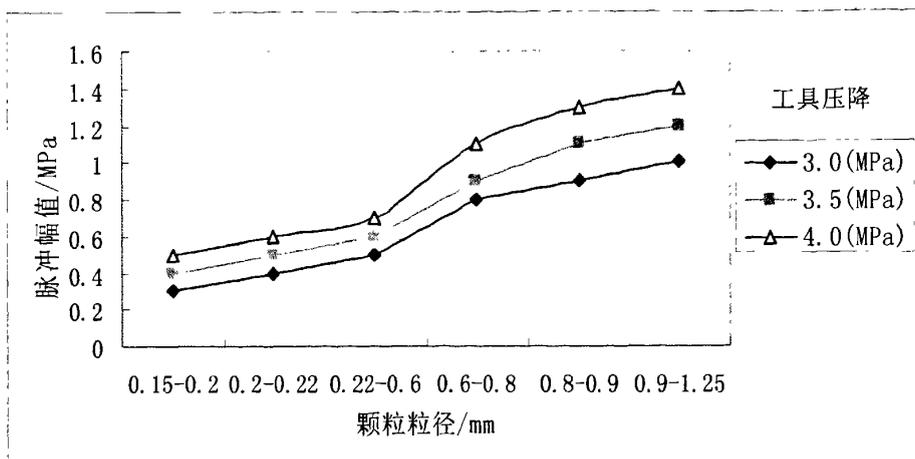


图 5-6 颗粒粒径对负压脉冲幅值的影响关系图

Fig5-6 The relation of particle size and pulse Aptitude

从图 5-6 可以看出，在一定的粒径范围内^[34]，随着颗粒粒径的增加负压脉冲幅值增大。一定频率的脉冲波适合在某种颗粒粒径范围内传播，在该范围内脉冲衰减严重，脉冲幅值就大。在这个范围之外，颗粒粒径越大，越有利于脉冲传播，即脉冲衰减弱，脉冲幅值大。

可以看出脉冲波在低渗透率的地层中传播时，脉冲幅值在高渗透率的地层传播时消耗能量大，衰减快。所以脉冲波在高渗地层中传播效果要高于低渗地层。即脉冲波在高渗地层的解堵效果比低渗地层的解堵效果要好。

5.4.3 炮孔不同深度处的负压脉冲幅值

实验研究了在模拟圆形出水口直径为 25mm，振荡腔体积为 $3.07 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，炮孔填砂粒径为 0.22-0.6mm 条件下，负压脉冲幅值与炮孔深度影响规律。表 5-5 是模拟炮孔深度与负压脉冲幅值关系数据表。

表 5-5 炮孔深度与负压脉冲幅值关系数据表

Table5-5 The relation of sand pipe depth and pulse aptitude

炮孔深度 脉冲幅值	20/mm	120/mm	220/mm	320/mm	420/mm	520/mm
3.0/MPa	1.4	1.2	0.8	0.6	0.5	0.4
3.5/MPa	1.6	1.3	0.9	0.7	0.6	0.5
4.5/MPa	1.8	1.5	1.1	0.9	0.8	0.7

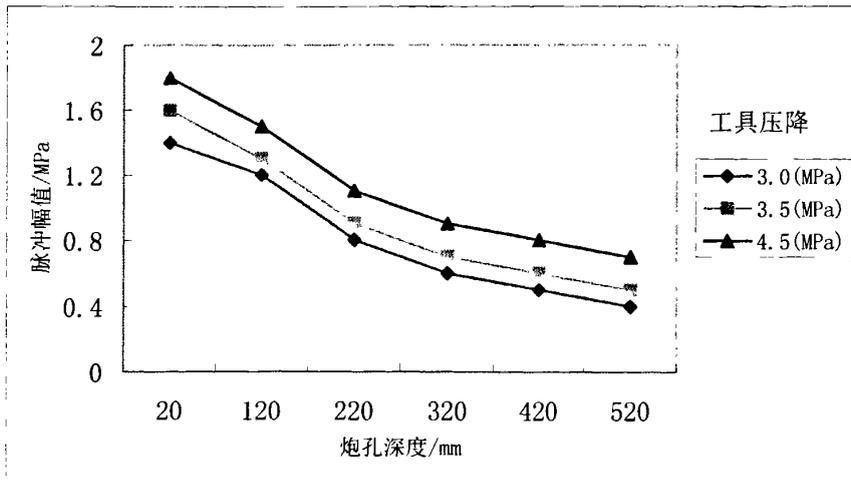


图 5-7 炮孔（填砂）深度对负压脉冲幅值影响关系图

Fig5-7 The relation of Shothole depth and aptitude of pulse

从图 5-7 可以看出，在填炮孔的最前段，由于脉冲流体振荡剧烈，能量损失严重，故负压脉冲衰减最严重，所以脉冲幅值也就大，随着炮孔深度的增加脉冲衰减减弱，脉冲幅值随之减小。

我们可以得出负压脉冲幅值随着作用深度的增加，脉冲幅值逐渐减弱。工具压降低的脉冲都能作用穿透半米以上，那么当工具压降很大时对炮孔堵塞层的作用深度将会更大。从而可以得出负压脉冲波对炮孔堵塞起到很好的解堵效果。

5.5 本章小节

本章主要对负压脉冲射流在模拟炮孔里流动时的脉冲值进行了研究，设计了负压脉冲射流清洗炮孔模拟装置，实验研究了水力参数、振荡腔结构参数以及工具压降对负压脉冲射流脉动幅值的影响；利用炮孔填砂，通过实验研究了负压脉冲射流清洗不同堵塞程度的炮孔中的传播特点，评价了清洗效果。得到结论：

- (1) 负压脉冲幅值随工具压降的增大而增大；
- (2) 负压脉冲幅值随振荡腔室体积增大而减小；
- (4) 在炮孔中堵塞物相同的条件下，负压脉冲幅值随着炮孔深度的增加而下降，较低压力的脉冲波都能作用穿透 0.5m 以上。
- (5) 在一定的粒径范围内，堵塞颗粒的粒径越粗，渗透率越高，负压脉冲幅值衰减越慢。

结 论

本文针对解决油井生产过程中炮孔堵塞问题，采用理论分析和实验相结合的方法对负压脉冲射流洗井提高产量的机理进行研究。研究内容主要包括负压脉冲洗井的工作原理的理论、负压脉冲射流清洗炮孔堵塞机理实验和负压脉冲射流清洗炮孔特性及压力波衰减实验三部分。所得结论如下：

(1) 根据负压脉冲射流清洗炮孔原理，建立了理论模型和实验模型，理论分析和实验都表明：负压脉冲幅值随工具压降的增加而增加；此外脉冲幅值与振动腔体积有关，负压脉冲幅值随着腔体积的增加而减小，随着振动腔体积的减小而增加。

(2) 利用人造岩样模拟炮孔堵塞物，进行了负压脉冲射流清洗炮孔机理的实验，实验发现：负压脉冲冲击可有效降低岩样强度；负压脉冲幅值越大，对岩样的清洗效果越好；脉冲射流作用的时间越长，对岩样的清洗效果越好。

(3) 通过负压脉冲射流清洗炮孔的模拟实验，研究了负压脉冲波在炮孔中的衰减特点，评价了负压脉冲射流清洗炮孔的有效性，实验发现：负压脉冲幅值随着作用深度的增加，脉冲幅值逐渐减弱，较低压力的脉冲波都能作用穿透 0.5m 以上；炮孔堵塞程度越轻，渗透率越高，则脉冲幅值衰减越缓慢，压力波传播越深。

针对本文所做的研究，提出以下建议：

理论上，负压脉冲的传播振动频率也是影响地层解堵效果，所以脉冲频率清洗炮孔效果的影响关系还有待与进一步研究。

参考文献

- [1] 李根生, 马加计, 沈晓明, 等. 高压水射流处理地层的机理和试验[J]. 石油学报, 1998, 19 (1): 96—99
- [2] Milligan M, et al. Coiled Tubing Drilling of Horizontal Sidetrack in House Mountain Field, Albera[J]. IADC/SPE 35127, 1996: 685-691
- [3] 马加骥, 沈晓明, 李根生, 等. 高压水射流油井解堵技术的研究[J]. 石油钻采工艺, 1996, 18 (6): 85—88
- [4] 李根生, 熊伟, 宋剑, 等. 高压水射流深穿透射孔产能影响因素[J]. 石油钻采工艺, 1996, 28 (4): 60—63
- [5] 马建国. 油气藏增产新技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 67—70
- [6] 沈永祥. 物理振动法在采油上的应用[J]. 油气开发工程译丛, 1983, 12 (2): 45—49
- [7] 马宏斌. 声波-超声波采油技术的研究发展及应用[J]. 采油工艺情报, 1991, 6 (1): 12—16
- [8] Poesio P, Ooms G. Formation and ultrasonic removal of fouling particle structures in a natural porous material[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004(45): 159-178
- [9] 尹强, 徐强, 臣传旭, 等. 压力脉冲解堵影响因素及室内试验研究[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24 (4): 70—71
- [10] 梁春, 李庆, 焦亚凤. 水力振动法处理油层技术的研究和应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 25 (2): 65—67
- [11] 杨云霞, 潘华, 曹雪洪. 负压钻井技术的发展与应用[J]. 石油钻探技术, 1998, 26 (4): 32—34
- [12] 杨永印, 沈忠厚, 王瑞和. 低压脉冲射流井底欠平衡钻井提高钻速机理分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 30 (5): 15—16
- [13] 徐华义, 聂翠平, 吴华. 井底降压差短节显著提高机械钻速[J]. 石油钻探技术, 1998, 26 (1): 40—42
- [14] 陈小榆, 练章华, 蒋洪. 井下机械式脉动发生器的实验研究[J]. 西南石油学院学报, 2000, 22 (2): 27—30
- [15] 陈庭根, 管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 85—90

- [16] 张国忠. 流道瞬变流动分析[M]. 东营: 石油大学出版社, 1994: 37—52
- [17] 徐文波, 秦国伟, 陶洪辉, 等. 负压洗井技术在低渗油田开发中的应用[J]. 特种油气藏, 2005, 12 (5): 76—77
- [18] 牛世龙. 水力振荡解堵技术的应用[J]. 石油矿场机械, 2002, 31 (4): 38—40
- [19] 段荣杰, 汪玉华. 使用水力脉冲器处理近井地带[J]. 国外油田工程, 2005, 21 (9): 19—20
- [20] 张德强, 王青涛, 李传乐, 等. 高压水射流解堵增产增注技术[J]. 断块油气田, 1997, 4 (6): 39—42
- [21] 齐笑生, 常公喜, 魏晓宏. 波动法处理油层技术[J]. 断块油气田, 2001, 6 (2): 59—61
- [22] 宋建平, 陈建华, 刘斌. 低频脉冲波强化采油技术研究及试验[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16 (6): 81—83
- [23] 董贤勇, 张平, 林日亿. 超声波对胜利浅海原油降粘试验研究[J]. 油气储运, 2004, 23 (3): 32—35
- [24] 孙仁远. 人工振动降粘试验研究[J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2001, 25 (4): 54—57
- [25] 张建国, 刘全国, 甄思广. 低频水力振荡器解堵原理及现场应用[J]. 石油钻采工艺, 2003, 27 (5): 47—49
- [26] 杨永超, 崔大庆, 谭国华, 等. 高压水射流解堵技术的研究及应用[J]. 油气井测试, 1998, 7 (4): 47—50
- [27] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998: 165—175
- [28] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986: 17 (6): 87—188
- [29] 程卫国, 冯峰, 王雪梅. MATLAB5.3 精要、编程及高级应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 30—35
- [30] 陈庭根, 管志川. 钻井工程理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 146—147
- [31] 王素霞. 波的能量与振幅的关系[J]. 濮阳教育学院学报, 2003, 16 (1): 26—29
- [32] 李根生, 黄中伟, 张德斌, 等. 地层中自激波动注水水流能量传播理论模型[J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2001, 25 (5): 26—29

- [33] 孙仁远, 成国祥. 人工振动增产理论与试验研究[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25 (6): 78—80
- [34] 贺如. 低频水力振动在岩心中的传播特性实验[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30 (3), 126—128

附 录

附录 1 空气法测量岩样渗透率的测量数据

序号	岩样号	平均直径/cm	平均长度/cm	汞柱	水柱/cm	流量/ cm ³ /s	渗透率 /mD	平均渗透率/mD
1	5-1	2.5	6.0	230	19.1	0.3616	11.689	12.019
		2.5	6.0	270	17.2	0.3616	12.357	
		2.5	6.0	295	15.3	0.3616	12.010	
2	5-6	2.5	6.0	480	19.7	0.3616	25.289	24.815
		2.5	6.0	500	18.4	0.3616	24.604	
		2.5	6.0	540	17.0	0.3616	24.551	
3	5-8	2.5	6.0	230	20.0	4.025	137.894	134.247
		2.5	6.0	240	18.7	4.025	134.537	
		2.5	6.0	270	16.1	4.025	130.310	
4	5-11	2.5	6.0	235	19.2	0.3616	12.006	12.344
		2.5	6.0	275	17.4	0.3616	12.732	
		2.5	6.0	300	15.4	0.3616	12.293	
5	5-12	2.5	6.0	240	19.3	0.3616	12.325	12.613
		2.5	6.0	270	17.6	0.3616	12.645	
		2.5	6.0	310	15.6	0.3616	12.868	
6	5-13	2.5	6.0	245	19.4	0.3616	12.647	12.867
		2.5	6.0	275	17.6	0.3616	12.879	
		2.5	6.0	315	15.6	0.3616	13.076	
7	5-61	2.5	6.0	485	19.8	0.3616	25.682	25.812
		2.5	6.0	520	18.6	0.3616	25.867	
		2.5	6.0	550	17.6	0.3616	25.888	
8	5-62	2.5	6.0	490	19.8	0.3616	25.947	26.284
		2.5	6.0	525	18.8	0.3616	26.396	
		2.5	6.0	560	17.7	0.3616	26.509	

附录 1 空气法测量岩样渗透率的测量数据 (续)

9	5-63	2.5	6.0	500	19.9	0.3616	26.610	26.895
		2.5	6.0	530	18.9	0.3616	26.789	
		2.5	6.0	570	17.9	0.3616	27.287	
10	5-81	2.5	6.0	240	20.1	4.025	142.261	140.600
		2.5	6.0	250	18.8	4.025	138.604	
		2.5	6.0	295	16.2	4.025	140.934	
11	5-82	2.5	6.0	245	20.1	4.025	145.225	144.955
		2.5	6.0	255	18.9	4.025	142.128	
		2.5	6.0	305	16.4	4.025	147.510	
12	5-83	2.5	6.0	255	19.5	4.025	146.640	147.368
		2.5	6.0	260	19.1	4.025	146.449	
		2.5	6.0	310	16.3	4.025	149.014	
13	5-101	2.5	6.0	245	19.4	0.3616	12.647	12.867
		2.5	6.0	275	17.6	0.3616	12.879	
		2.5	6.0	315	15.6	0.3616	13.076	
13	5-102	2.5	6.0	250	19.4	0.3616	12.905	12.983
		2.5	6.0	280	17.6	0.3616	13.113	
		2.5	6.0	300	16.2	0.3616	12.932	
15	5-103	2.5	6.0	245	19.3	0.3616	12.582	13.150
		2.5	6.0	285	17.8	0.3616	13.499	
		2.5	6.0	320	15.7	0.3616	13.368	
16	5-601	2.5	6.0	500	19.9	0.3616	26.610	26.895
		2.5	6.0	530	18.9	0.3616	26.789	
		2.5	6.0	570	17.9	0.3616	27.287	
17	5-602	2.5	6.0	510	19.9	0.3616	27.142	27.364
		2.5	6.0	535	19.0	0.3616	27.185	
		2.5	6.0	580	17.9	0.3616	27.766	

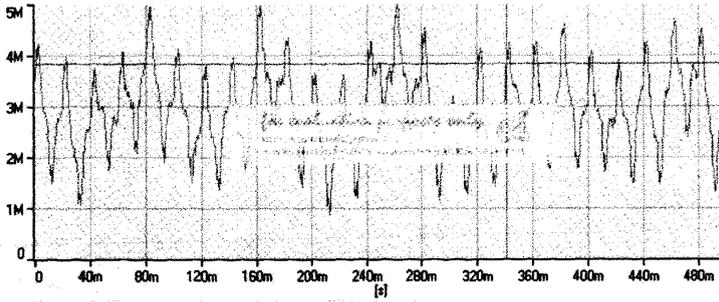
附录 1 空气法测量岩样渗透率的测量数据（续）

18	5-603	2.5	6.0	520	19.8	0.3616	27.536	27.561
		2.5	6.0	530	19.1	0.3616	27.073	
		2.5	6.0	580	18.1	0.3616	28.076	
19	5-801	2.5	6.0	255	19.5	4.025	149.060	149.800
		2.5	6.0	260	19.1	4.025	148.866	
		2.5	6.0	310	16.3	4.025	151.474	
20	5-802	2.5	6.0	260	19.4	4.025	151.204	153.127
		2.5	6.0	265	19.3	4.025	153.317	
		2.5	6.0	315	16.4	4.025	154.861	
21	5-803	2.5	6.0	265	19.4	4.025	154.112	156.470
		2.5	6.0	270	19.4	4.025	157.019	
		2.5	6.0	320	16.5	4.025	158.278	
22	5-110	2.5	6.0	230	19.2	0.3616	11.750	12.166
		2.5	6.0	275	17.3	0.3616	12.659	
		2.5	6.0	295	15.4	0.3616	12.088	
23	5-120	2.5	6.0	235	19.3	0.3616	12.068	12.434
		2.5	6.0	270	17.5	0.3616	12.573	
		2.5	6.0	305	15.6	0.3616	12.661	
24	5-130	2.5	6.0	245	19.3	0.3616	12.582	12.698
		2.5	6.0	270	17.6	0.3616	12.645	
		2.5	6.0	310	15.6	0.3616	12.868	
25	5-610	2.5	6.0	480	19.7	0.3616	25.289	25.174
		2.5	6.0	510	18.3	0.3616	24.960	
		2.5	6.0	540	17.5	0.3616	25.273	
26	5-620	2.5	6.0	485	19.8	0.3616	25.682	25.859
		2.5	6.0	520	18.7	0.3616	26.006	
		2.5	6.0	550	17.6	0.3616	25.888	

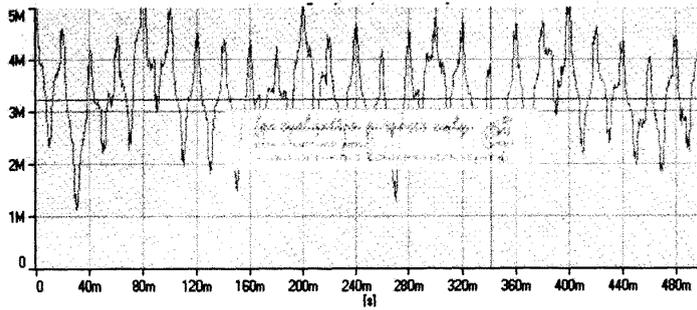
附录 1 空气法测量岩样渗透率的测量数据 (续)

27	5-630	2.5	6.0	490	19.8	0.3616	25.947	26.140
		2.5	6.0	520	18.8	0.3616	26.145	
		2.5	6.0	550	17.9	0.3616	26.329	
28	5-810	2.5	6.0	230	20	4.025	135.655	136.393
		2.5	6.0	245	18.8	4.025	135.832	
		2.5	6.0	290	16.1	4.025	137.690	
29	5-820	2.5	6.0	240	19.9	4.025	140.846	139.494
		2.5	6.0	245	18.8	4.025	135.832	
		2.5	6.0	295	16.3	4.025	141.804	
30	5-830	2.5	6.0	245	19.3	4.025	139.445	143.072
		2.5	6.0	260	19.1	4.025	146.449	
		2.5	6.0	300	16.2	4.025	143.323	

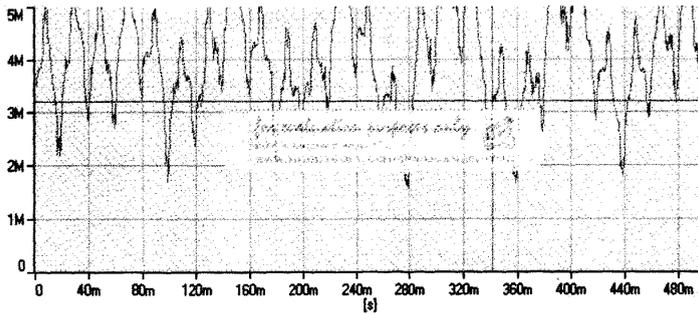
附录 2 模拟洗井装置实验实测波形图



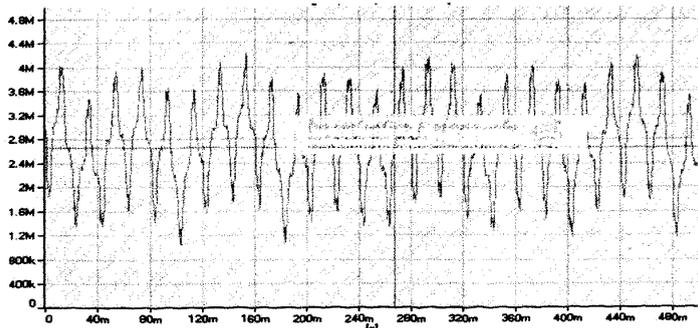
振荡腔体积 $V=2091\text{cm}^3$ 入口压力 $P=4.5\text{MPa}$



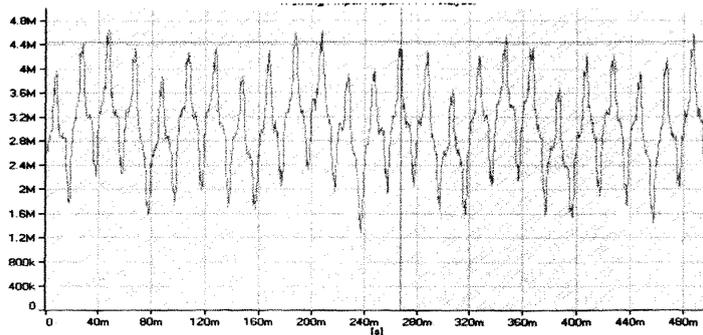
振荡腔体积 $V=2091\text{cm}^3$, 入口压力 $P=5.0\text{MPa}$



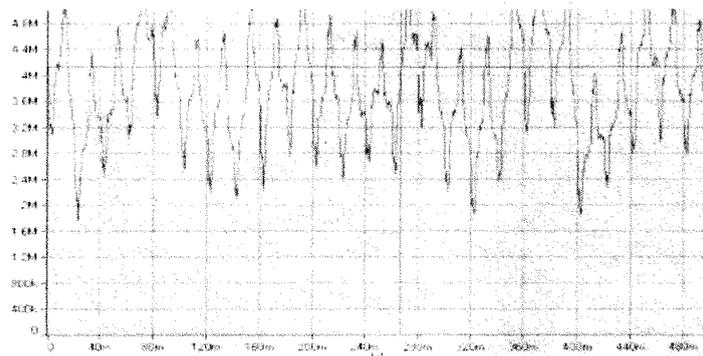
振荡腔体积 $V=2091\text{cm}^3$, 入口压力 $P=5.5\text{MPa}$



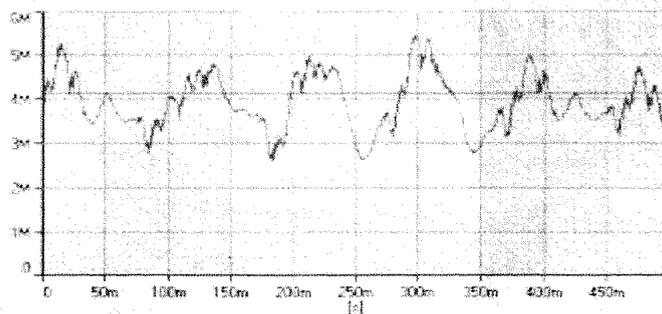
振荡腔体积 $V=2287\text{cm}^3$, 入口压力 $P=4.5\text{MPa}$



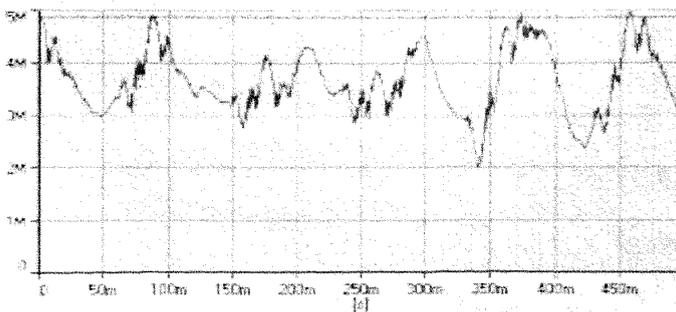
振荡腔体积 $V=2287\text{cm}^3$, 入口压力 $P=5.0\text{MPa}$



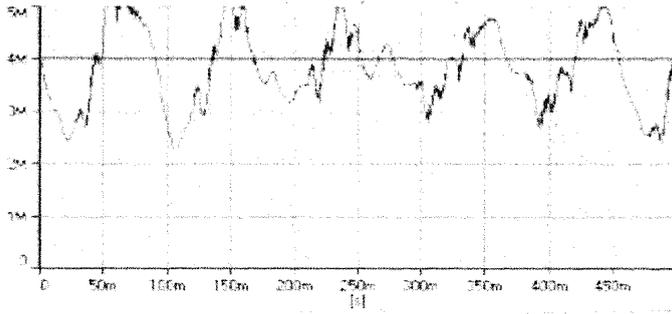
振荡腔体积 $V=2287\text{cm}^3$, 入口压力 $P=5.5\text{MPa}$



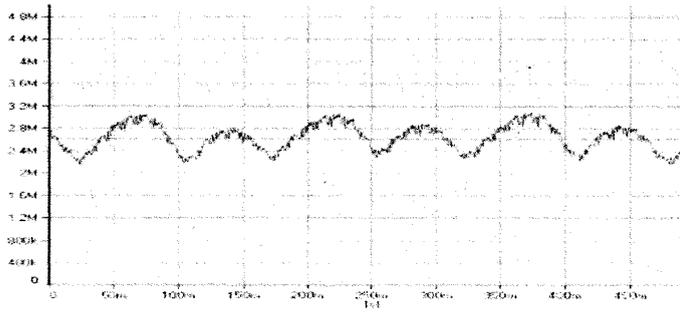
振荡腔体积 $V=2483\text{cm}^3$, 入口压力 $P=4.5\text{MPa}$



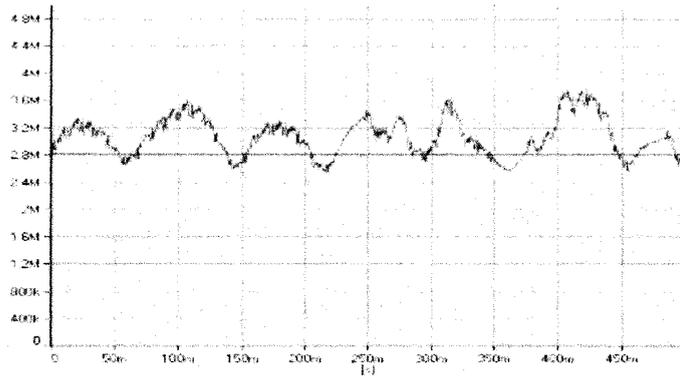
振荡腔体积 $V=2483\text{cm}^3$, 入口压力 $P=5.0\text{MPa}$



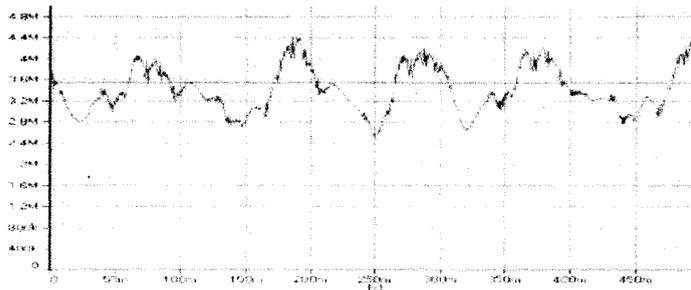
振荡腔体积 $V=2483\text{cm}^3$ ， 入口压力 $P=5.5\text{MPa}$



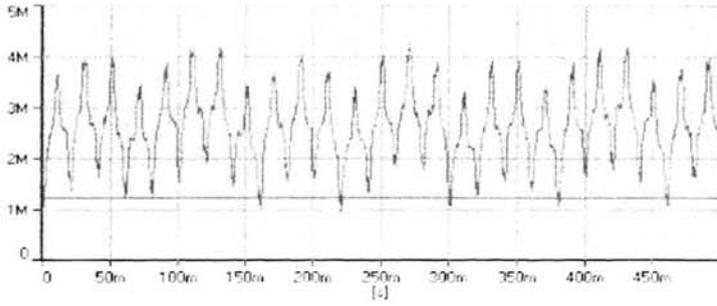
振荡腔体积 $V=2679\text{cm}^3$ ， 入口压力 $P=4.5\text{MPa}$



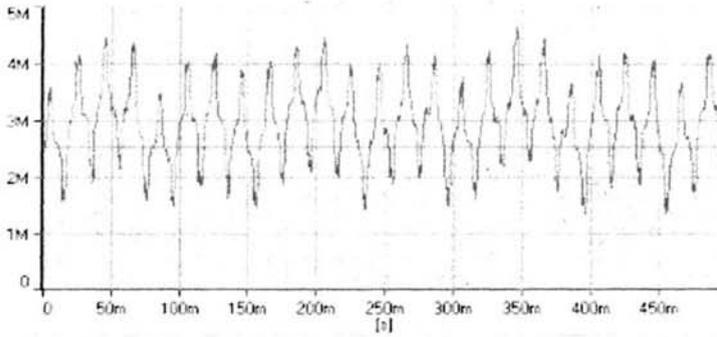
振荡腔体积 $V=2679\text{cm}^3$ ， 入口压力 $P=5.0\text{MPa}$



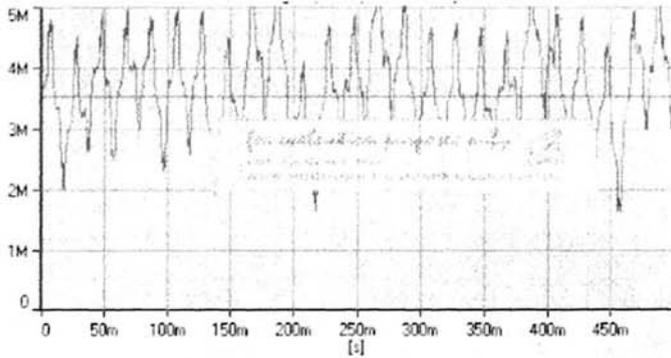
振荡腔体积 $V=2679\text{cm}^3$ ， 入口压力 $P=5.5\text{MPa}$



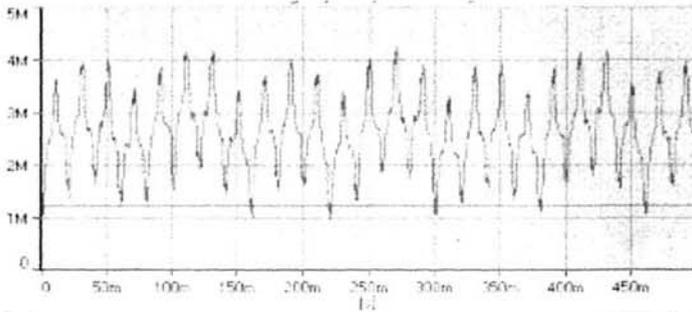
振荡腔体积 $V=2875\text{cm}^3$ ， 入口压力 $P=4.5\text{MPa}$



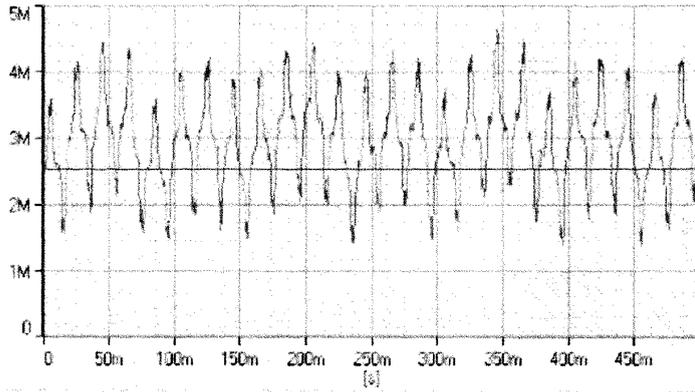
振荡腔体积 $V=2875\text{cm}^3$ ， 入口压力 $P=5.0\text{MPa}$



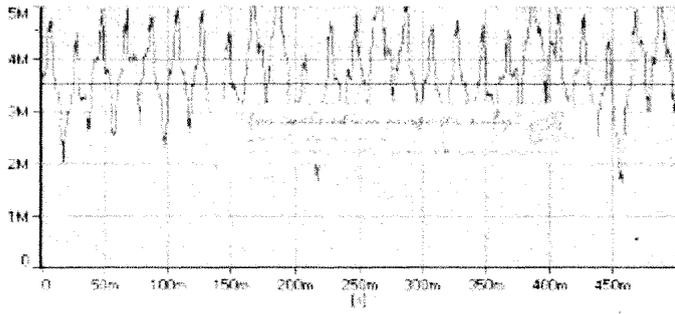
振荡腔体积 $V=2875\text{cm}^3$ ， 入口压力 $P=5.5\text{MPa}$



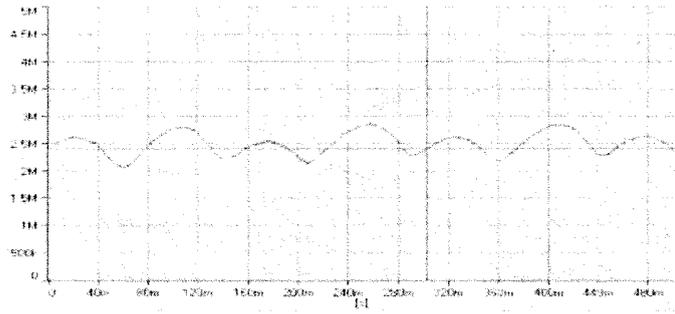
振荡腔体积 $=3071\text{cm}^3$ ， 入口压力 $=4.5\text{MPa}$



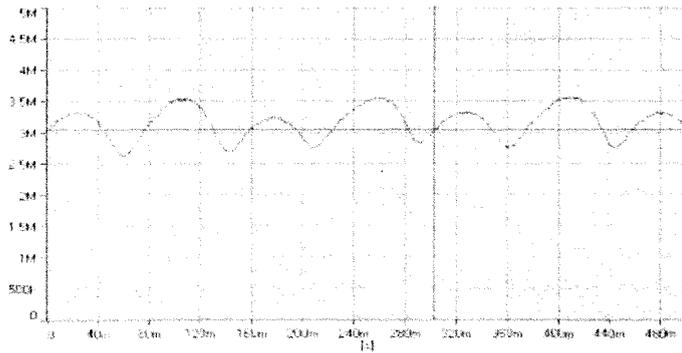
振荡腔体积=3071cm³, 入口压力=5.0MPa



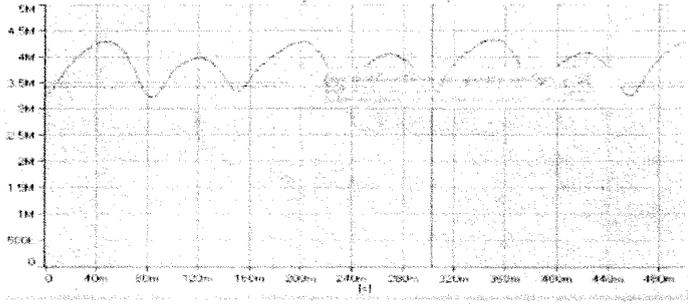
振荡腔体积=3071cm³, 入口压力=5.5MPa



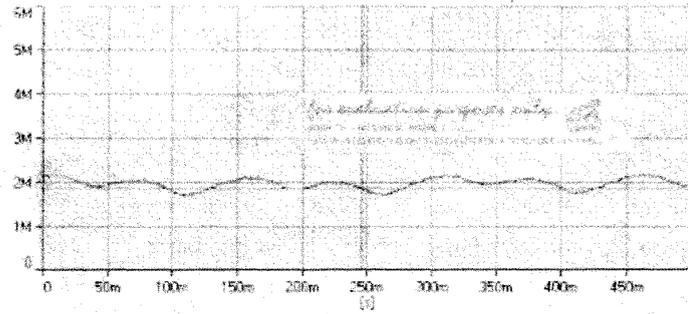
炮孔(填充砂)深度 20mm, 入口压力 P=3.0MPa



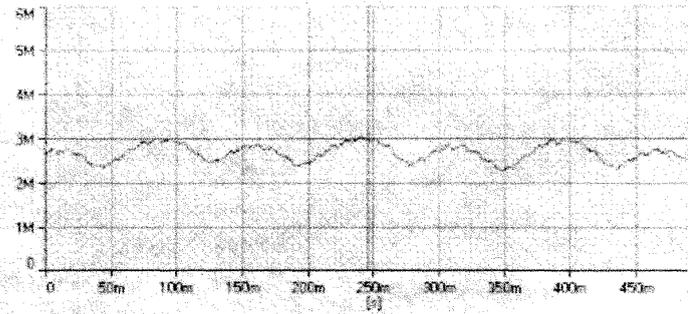
炮孔(填充砂)深度 20mm, 入口压力 P=3.5MPa



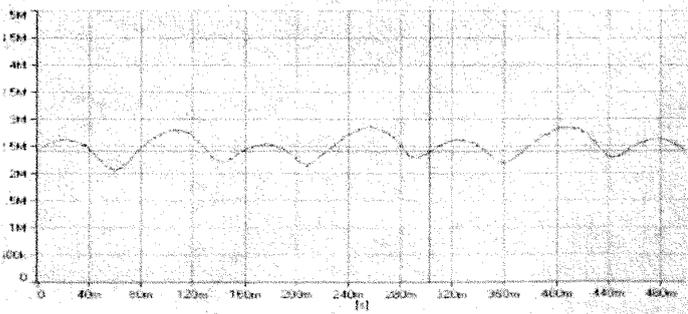
炮孔(填充砂)深度 20mm, 入口压力 P=4.0MPa



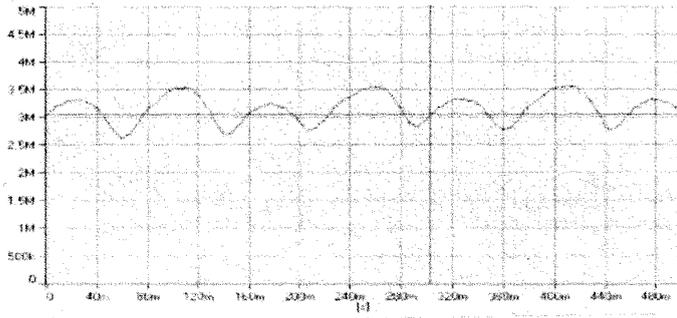
炮孔(填充砂)深度 120mm, 入口压力 P=3.0MPa



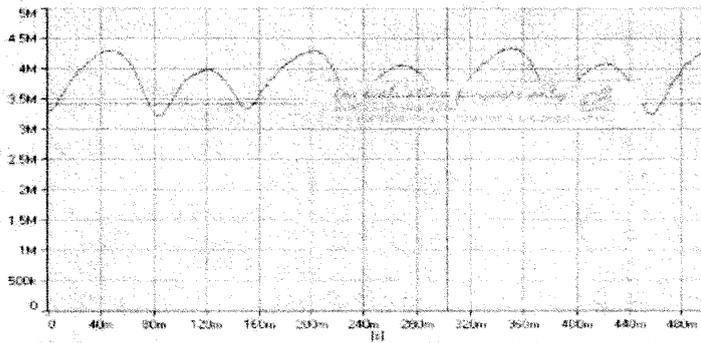
炮孔(填充砂)深度 120mm, 入口压力 P=3.5MPa



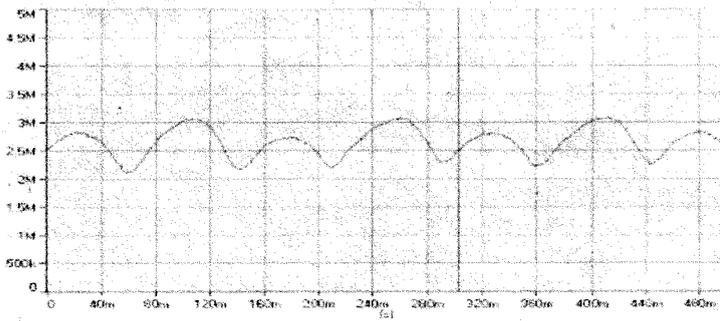
炮孔(填充砂)深度 120mm, 入口压力 P=4.0MPa



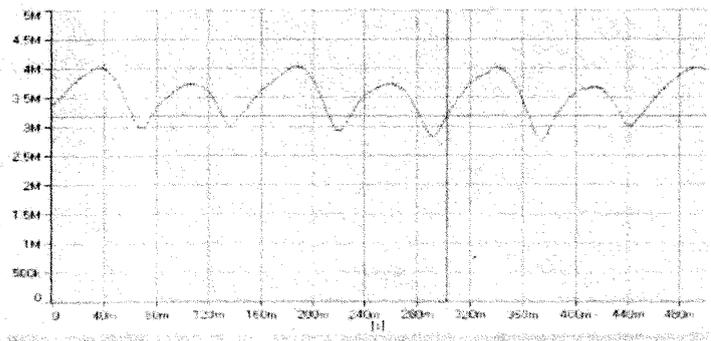
炮孔(填充砂)深度 220mm, 入口压力 P=3.0MPa



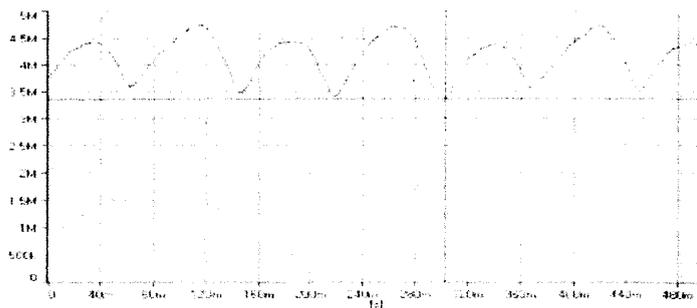
炮孔(填充砂)深度 220mm, 入口压力 P=3.5MPa



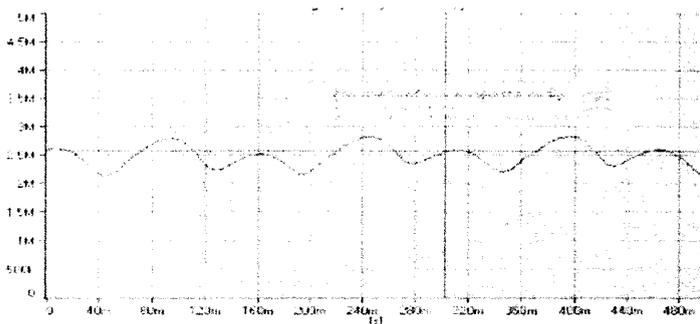
炮孔(填充砂)深度 220mm, 入口压力 P=4.0MPa



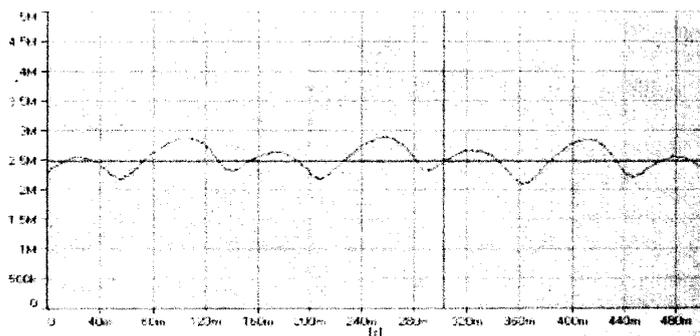
炮孔(填充砂)深度 320mm, 入口压力 P=3.0MPa



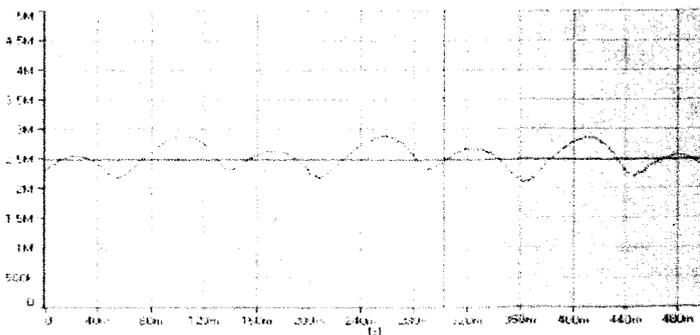
炮孔(填充砂)深度 320mm, 入口压力 P=3.5MPa



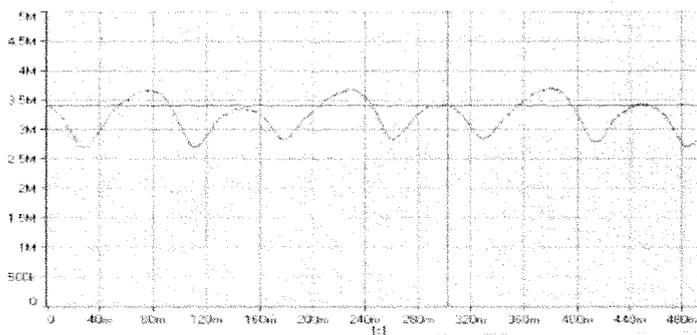
炮孔(填充砂)深度 320mm, 入口压力 P=4.0MPa



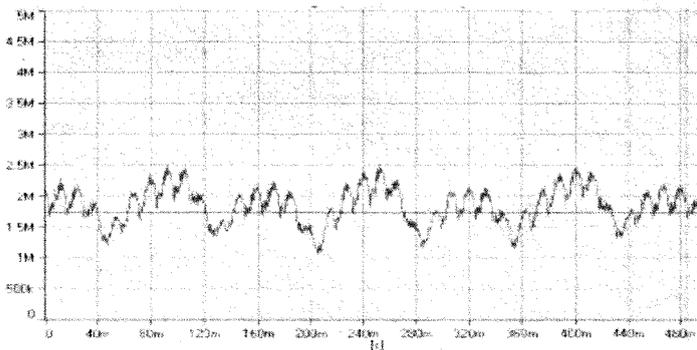
炮孔(填充砂)深度 420mm, 入口压力 P=3.0MPa



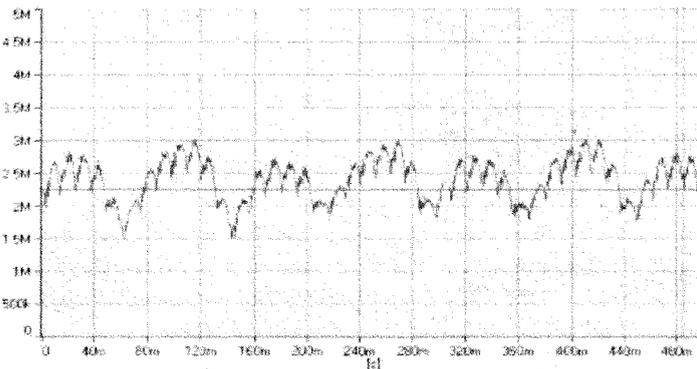
炮孔(填充砂)深度 420mm, 入口压力 P=3.5MPa



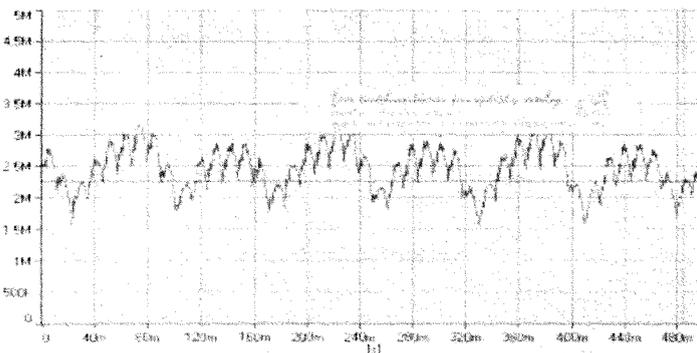
炮孔(填充砂)深度 420mm, 入口压力 P=4.0MPa



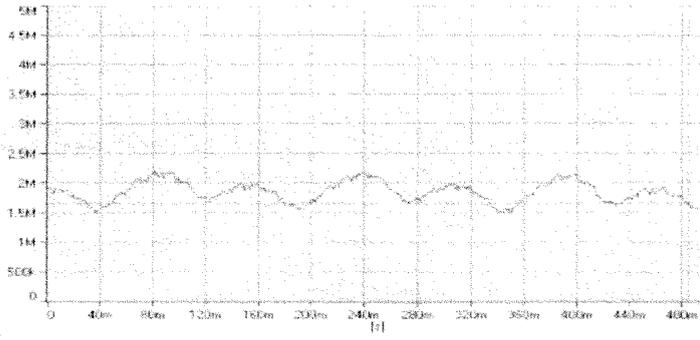
炮孔(填充砂)深度 520mm, 入口压力 P=3.0MPa



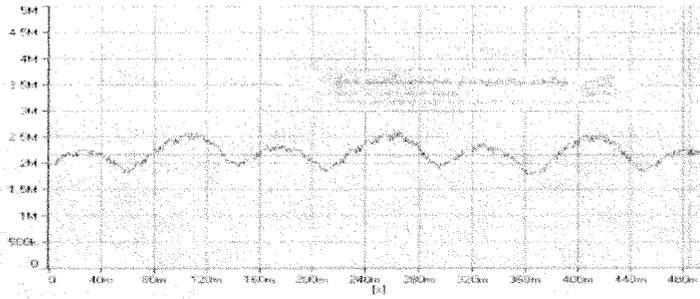
炮孔(填充砂)深度 520mm, 入口压力 P=3.5MPa



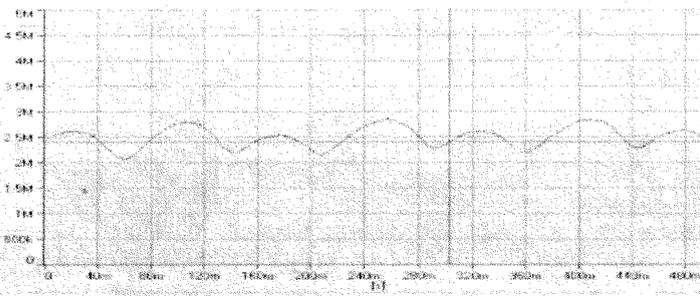
炮孔(填充砂)深度 520mm, 入口压力 P=4.0MPa



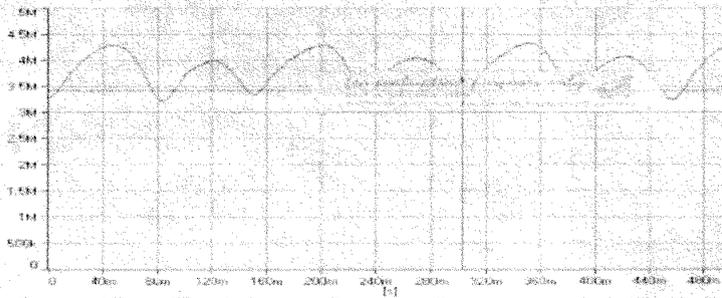
填充砂砂粒粒径 0.9mm-1.25mm, 入口压力=3.0MPa



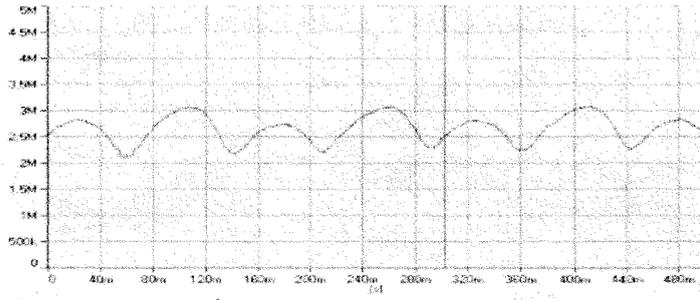
填充砂砂粒粒径 0.9mm-1.25mm, 入口压力=3.5MPa



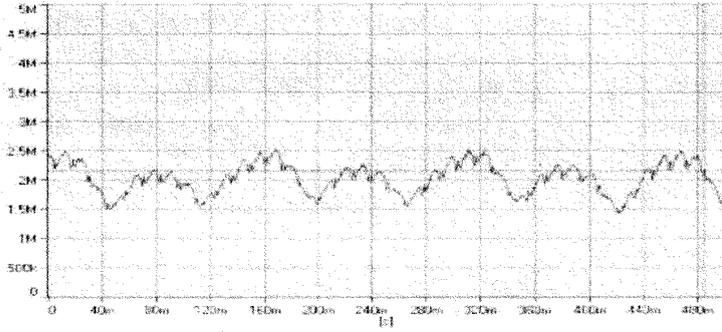
填充砂砂粒粒径 0.9mm-1.25mm, 入口压力=4.0MPa



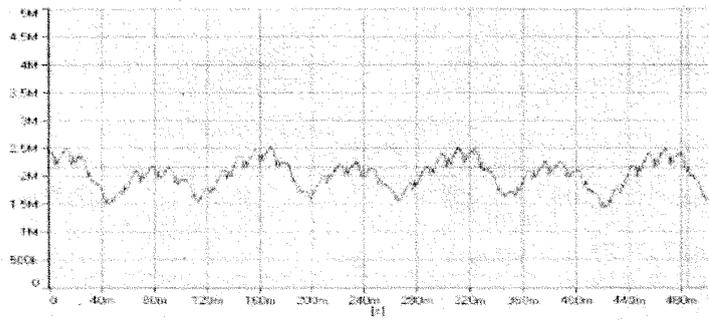
填充砂砂粒粒径 0.8mm-0.9mm, 入口压力=3.0MPa



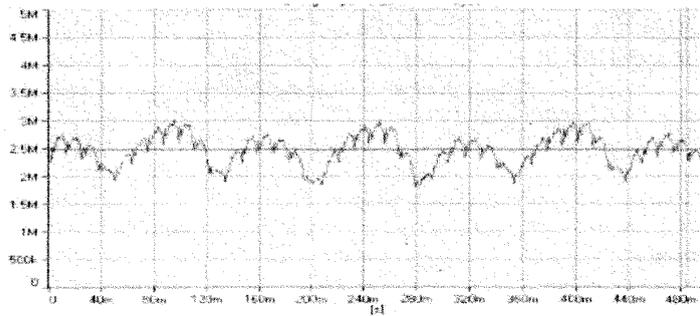
填充砂砂粒粒径 0.8mm-0.9mm, 入口压力=3.5MPa



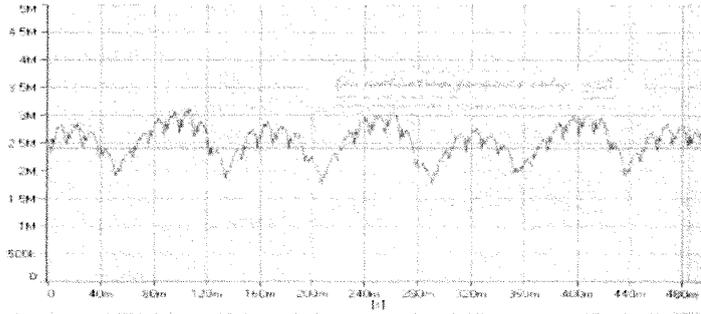
填充砂砂粒粒径 0.8mm-0.9mm, 入口压力=4.0MPa



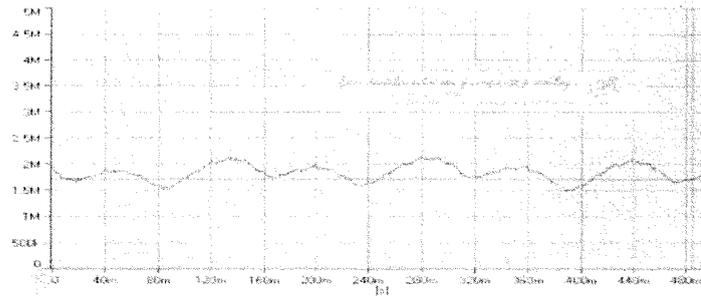
填充砂砂粒粒径 0.6mm-0.8mm, 入口压力=3.0MPa



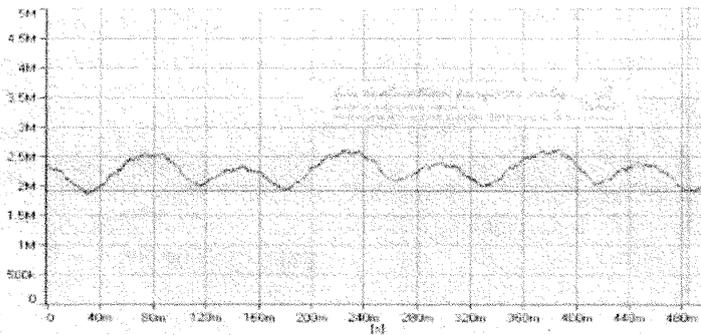
填充砂砂粒粒径 0.6mm-0.8mm, 入口压力=3.5MPa



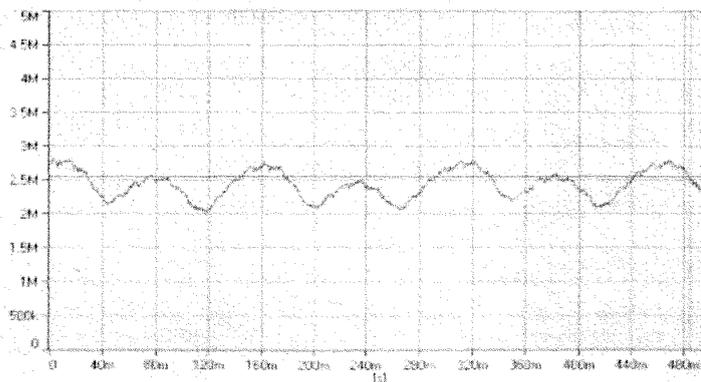
填充砂砂粒粒径 0.6mm-0.8mm, 入口压力=4.0MPa



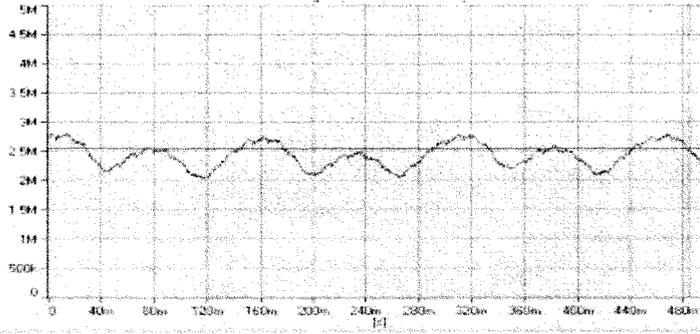
填充砂砂粒粒径 0.22mm-0.6mm, 入口压力=3.0MPa



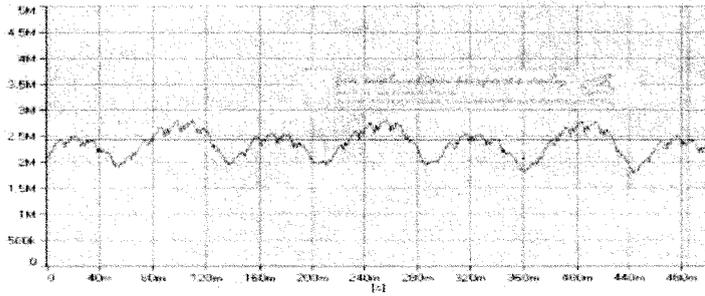
填充砂砂粒粒径 0.22mm-0.6mm, 入口压力=3.5MPa



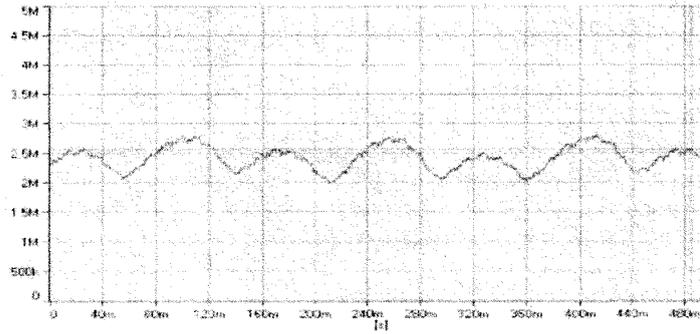
填充砂砂粒粒径 0.22mm-0.6mm, 入口压力=4.0MPa



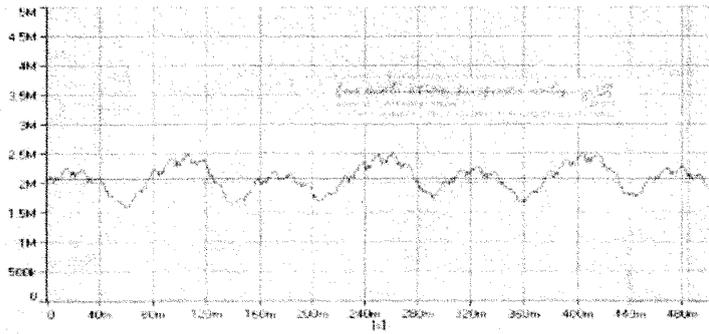
填充砂砂粒粒径 0.2mm-0.22mm, 入口压力=3.0MP



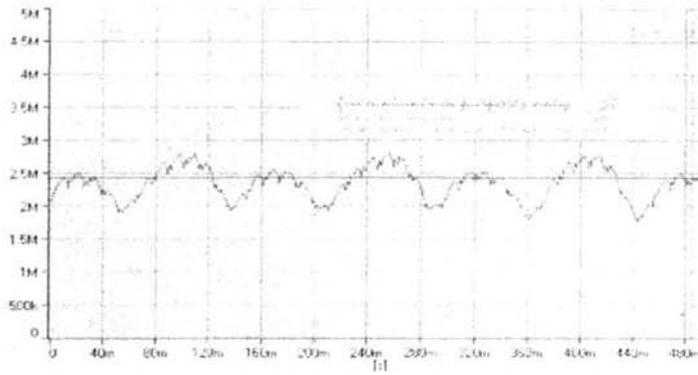
填充砂砂粒粒径 0.2mm-0.22mm, 入口压力=3.5MP



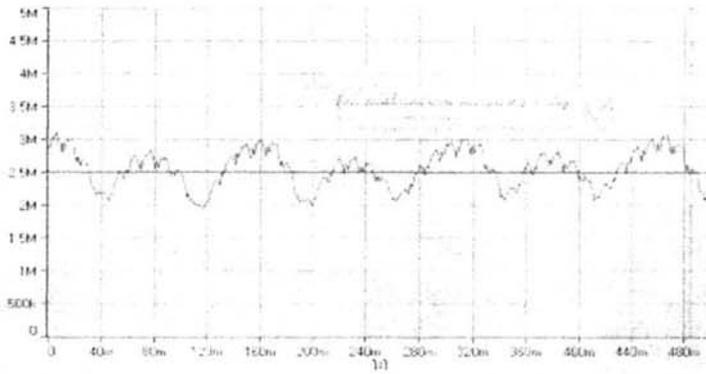
填充砂砂粒粒径 0.2mm-0.22mm, 入口压力=4.0MP



填充砂砂粒粒径 0.15mm-0.2mm, 入口压力=3.0MPa



填充砂砂粒粒径 0.15mm-0.2mm, 入口压力=3.5MPa



填充砂砂粒粒径 0.15mm-0.2mm, 入口压力=4.0MPa

攻读硕士学位期间的研究成果

(1) 参加中石油钻井重点实验室研究项目“负压脉冲射流提高钻速理论与技术”(合同号 05A20301)，该项目通过省级鉴定，成果总体达到国际先进水平。

(2) 参加中石油基础研究项目“微小井眼钻井技术研究与应用”(合同号 06A20201)。

致 谢

本文是在导师杨永印副教授的悉心指导下完成的，杨老师对论文的选题、开题、撰写和审阅方面都倾注了大量的时间和精力，给予了大量的指导。杨老师严谨的治学态度和科学的研究方法，都给我极大的启迪和教育，使我终生受益。在论文完成之际，向敬爱的导师表示衷心的感谢。

感谢高压水射流研究中心的陈丙泉、牟立福师傅在实验过程中所给予的支持和方便，感谢油藏实验室老师的大力帮助，感谢李记玉、张磊等同学帮助。

谨以此文献给所有帮助和关心我的亲人、老师、朋友和师兄弟。

作者: [贾学臣](#)
学位授予单位: [中国石油大学\(华东\)](#)

本文读者也读过(10条)

1. [闫方平](#) [江苏油田韦2区块挤注防垢技术研究](#)[学位论文]2008
2. [李明](#). [林文彬](#) [水井洗井技术的探讨](#)[期刊论文]-[西部探矿工程](#)2008, 20(8)
3. [许彦坤](#). [雷霞](#) [新型油井暂堵洗井技术研究及应用](#)[期刊论文]-[内江科技](#)2008, 29(11)
4. [金敬灿](#). [杨桂贤](#). [马庆龙](#). [邓超霞](#). [JIN Jing-can](#). [YANG Gui-xian](#). [MA Qing-long](#). [DENG Chao-Xia](#) [一种新型洗井机的设计与应用](#)[期刊论文]-[石油矿场机械](#)2007, 36(7)
5. [苏德胜](#). [王亿川](#). [顾文萍](#). [王光明](#) [油井射流热洗防油层污染洗井器的研制与应用](#)[期刊论文]-[石油机械](#)2006, 34(3)
6. [董增有](#). [高伟栋](#) [注水井洗井的专业化管理](#)[期刊论文]-[油气田地面工程](#)2006, 25(3)
7. [兰乘露](#) [创新洗井方式方法, 提高油田注水质量](#)[期刊论文]-[黑龙江科技信息](#)2010(21)
8. [曹磊](#) [注水井洗井方法浅析](#)[期刊论文]-[黑龙江科技信息](#)2008(8)
9. [杜国栋](#). [王莉](#). [丁利霞](#). [沙丽萍](#). [唐守忠](#) [提高油田注水井洗井有效率的措施](#)[期刊论文]-[中国科技博览](#)2010(4)
10. [宋涛](#). [刘遵权](#). [SONG Tao](#). [LIE Zun-quan](#) [抽油机井防污染洗井技术研究与应用](#)[期刊论文]-[机械工程师](#)2008(11)

引用本文格式: [贾学臣](#) [负压脉冲射流洗井机理研究](#)[学位论文]硕士 2008