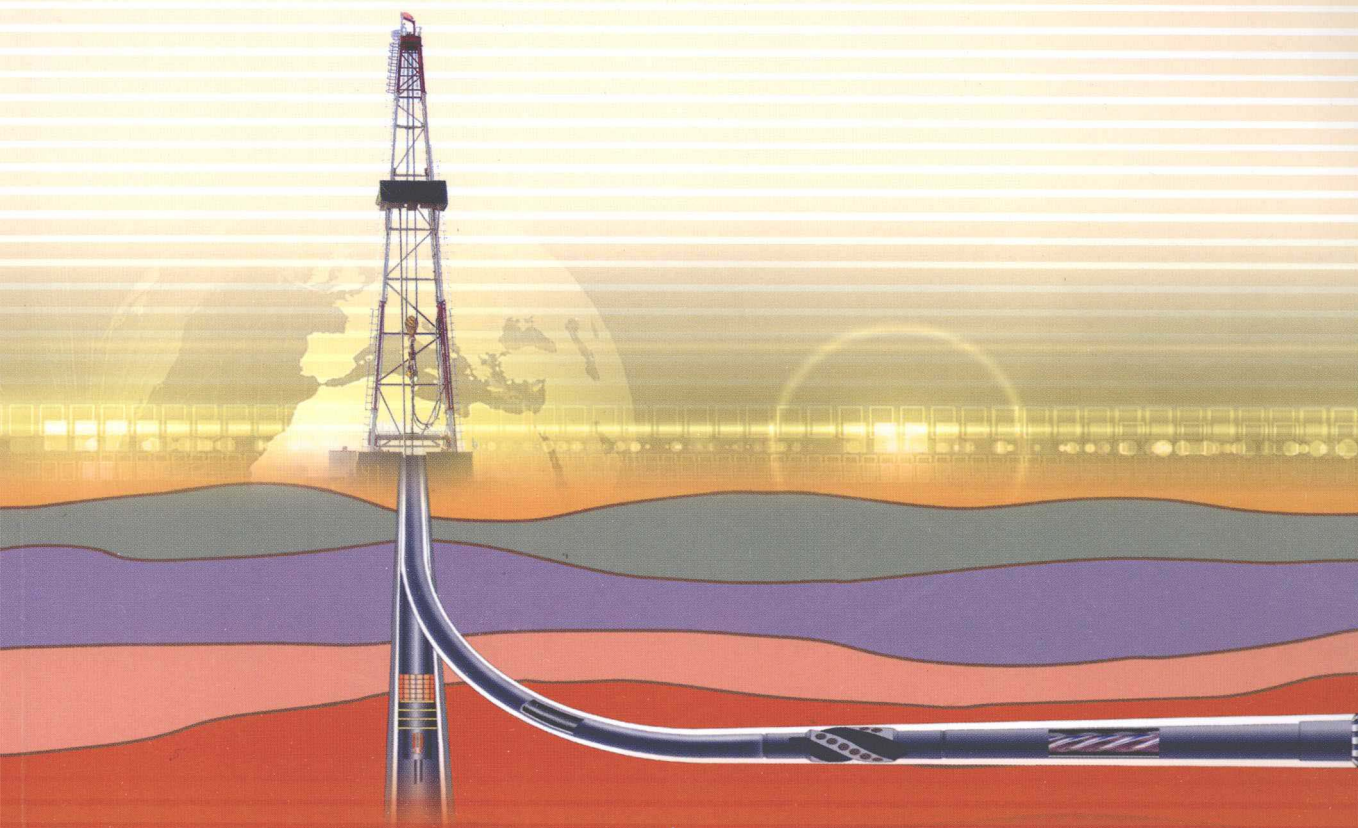


2010年

钻井基础理论研究
与前沿技术开发新进展

学术研讨会论文集

苏义脑 主编



石油工业出版社

2010 年钻井基础理论研究 与前沿技术开发新进展 学术研讨会论文集

苏义脑 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书为 2010 年钻井基础理论与前沿技术开发的新进展学术研讨会的论文集, 主要包括: 高压射流研究、欠平衡钻井研究、高效破岩钻井技术研究、井下测控技术研究、井壁稳定研究、钻井液研究、防漏堵漏技术研究、固井技术研究等, 反映了我国钻井领域最近几年的最新研究成果及研究方向。

本书适合从事油气钻井技术研究和应用的技术人员、管理人员和高校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

2010 年钻井基础理论与前沿技术开发新进展学术研讨会论文集 / 苏义脑主编. —北京: 石油工业出版社, 2012.3

ISBN 978-7-5021-8941-9

I . 2…

II . 苏…

III . 油气钻井—文集

IV . TE2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 021920 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523562 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 38.75

字数: 915 千字 印数: 1—1500 册

定价: 150.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

《2010 年钻井基础理论与 前沿技术开发新进展学术研讨会论文集》

编 委 会

主 编：苏义脑

副主编：周英操 盛利民

编 委：(排名不分先后)

李根生	徐依吉	宋先知	邓金根	蔚宝华	蒲晓林
孙金声	黄进军	周 静	谢海明	尚海燕	窦修荣
唐雪平	李 林	王家进	孟英峰	李永杰	李 皋
练章华	陈一健	吕光明	高永会	刘爱萍	夏宏南
杨明合	闫 铁	李 玮	李士斌	孙晓峰	毕雪亮
徐鸣雨					

学术研讨会主办单位：

油气钻井技术国家工程实验室

中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室

中国石油学会工程专业委员会钻井工作部钻井基础理论学组

2010 年钻井基础理论与 前沿技术开发新进展学术研讨会

开 幕 词

(代前言)

尊敬的各位领导，各位专家，各位代表：

大家好！

在这秋色宜人的名城成都，在享誉全国的著名石油高等学府—西南石油大学，经过半年多来的酝酿和筹备，由油气钻井技术国家工程实验室、中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室、中国石油学会工程专业委员会钻井工作部钻井基础理论学组联合主办的“钻井基础理论与前沿技术开发新进展学术研讨会”今天召开了。我谨代表此次会议的三个主办单位和组织，向与会的各位领导、各位专家和代表，表示热烈的欢迎和衷心的问候！

参加本次会议的有来自中石油、中石化、中海油等三大集团公司，石油高等院校的领导和专家共计 110 人，包括油气钻井技术国家工程实验室理事会理事及其所在单位代表、钻井基础理论学组的代表、钻井工程重点实验室的代表和研究人员、特邀专家和人选论文的作者。

此次会议得到了有关领导部门、依托单位和著名专家的大力支持。中国石油天然气集团公司科技发展部、中国石油集团钻井工程技术研究院、西南石油大学有关领导同志也在百忙之中莅临会议并将作重要讲话。让我们再次以热烈的掌声向他们表示感谢！

本次会议是第 5 届“钻井基础理论与前沿技术开发新进展学术研讨会”，也是 CNPC 钻井工程重点实验室自 2000 年成立以来的第 5 次全国学术大会，是钻井基础理论学组自 1991 年成立以来的第 9 次学术会议；同时也是集团公司对所属重点实验室进行整顿、钻井工程重点实验室重新挂牌后召开的第一次学术会议，更是油气钻井技术国家工程实验室批准挂牌、理事会成立后召开的第一次学术大会。

油气钻井技术国家工程实验室是我国油气钻井高新技术研究与开发的国家队，肩负着重要的历史使命。其定位是：瞄准世界钻井技术发展趋势，开展钻井重大技术发展方向的基础理论和方法研究；针对国内和海外勘探开发钻井中的重大技术、装备瓶颈问题展开攻关；立足自主创新和突出原创性，开展钻井工程前沿技术、高新技术和储备技术的开发，为我国钻井技术中长期发展、提升自主创新能力提供强有力支撑。其建设总目标是：建成“国内第一，国际先进”的钻井技术实验室，建立具有中国特色并具有国际竞争力的“产学

研”一体化研发中心、产业化基地和钻井高技术创新人才基地。油气钻井技术国家工程实验室的建立，充分体现了国家对钻井技术发展的高度重视，也标志着我国的钻井技术发展进入了一个新阶段。

中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室自 2000 年 12 月 22 日成立以来，已走过了十年由初建到提升的发展历程。特别是 2008 年集团公司决定对重点实验室进行整顿和扩建，投入大量资金更新实验装备，给实验室的发展注入了强大活力。现在，钻井工程重点实验室已由原来的主体实验室和 4 个研究室扩展为主体实验室和 8 个研究室，几乎覆盖了全部的石油高等院校。我们正面临着一个新的战略发展机遇期。

众所周知，钻井工程是石油工业不可或缺的重要组成部分，以钻井为代表的工程技术和勘探、开发共同构成支撑石油工业上游业务的三大支柱。当今世界钻井技术总的发展趋势是向更深、更快、更经济、更清洁、更安全和更聪明（“六更”）的方向发展。高投入、高产出、高风险和高技术（“四高”）则是当代油气钻井工程的特征。特别是 20 世纪 80 年代中期以来，钻井的“高技术”特征，即信息化、智能化、集成化特点愈加明显。目前钻井工程和技术正在经历“三个转变（扩展）”，即钻井的功能由构建一条传统意义上的油气通道向提高勘探成功率和开发采收率及油气产量转变（扩展）；钻井技术也由单一解决工程自身问题向解决“增储上产”问题转变（扩展）；我国的钻井科研逐步从学习和跟踪国外为主向自主创新转变（扩展）。从这个意义上说，加强钻井基础理论研究和前沿技术、储备技术的开发，对满足当前勘探、开发的需求和为我国石油工业的可持续发展提供强有力的支撑，就显得尤为重要。而这些也正是油气钻井技术国家工程实验室和中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室的使命和职责。

我们这次会议是在一个新的形势和时机下召开的，有两点值得我们高度关注：其一是胡锦涛总书记在今年 6 月的两院院士大会的报告中，就当前要重点推动的科技工作提出 8 点意见，把“大力发展能源资源开发利用科学技术”列在首位；其二是目前正处于国家“十一五”即将结束、“十二五”即将开始的时机，认真交流五年来我们在钻井基础研究和前沿技术开发方面的新进展，总结经验，讨论和谋划未来五年在这一领域的研究方向和工作，为制定“十二五”规划提出意见和建议，将是本次会议的重要内容。

本次会议还专门安排参观自贡盐业技术博物馆。大家知道，我国古代的钻井技术在世界上居于领先地位，曾被一些学者誉为中国的“第五大发明”。在那里，我们可以看到自先秦直至晚清我国钻井技术的伟大成就，可以说现代钻井技术几乎全部都能从中找到它的基因和雏形。这是中国人的骄傲，更是中国钻井人的骄傲，但尤其是我们当代钻井科技人的压力和动力。我国现在已经成为世界钻井大国，但还不是钻井强国，要使中国的钻井技术重新跃居世界前列，需要我们大家的努力奋斗。

加强基础研究、突出技术创新、瞄准前沿进展、做好战略储备，是一项必须常抓不懈、孜孜以求的工作。在座的各位都是从事钻井基础理论研究、前沿技术开发和科研管理工作的精英，发展我国钻井基础研究与前沿技术的重任，责无旁贷地落在各位代表的肩上。让我们会聚一堂，交流成果与心得，共商发展，谋求创新，加大原创，为推动我国钻井基础理论和前沿技术的发展而出谋划策。

本次会议得到了西南石油大学领导与员工的大力支持。在此，我代表会议的三个主办

单位向他们表示由衷的谢意！

预祝本次会议取得圆满成功！

谢谢大家！

苏义脑

2010-10-24，成都

目 录

利用射流改进井底流场的研究·····	杨永印 裴建忠 孙伟良等 (1)
基于破碎能耗的钻速方程及其应用·····	李 玮 闫 铁 (8)
井筒复杂多相流模拟实验架研究·····	孟英峰 李永杰 彭彦理 (15)
井下控制系统的工程设计实践与思考·····	宋廷淳 邓 乐 (21)
OFDM 技术在钻杆声波信道中的应用研究 ·····	尚海燕 周 静 谢海明 (26)
钻柱中声波传输特性理论与实验研究·····	江正清 蔡文军 安庆宝等 (34)
连续波随钻测量信号井下传输特性分析·····	边海龙 苏义脑 李 林 (42)
应力波井筒数据传输技术综述·····	罗 维 杨 洪 邢鹏云等 (50)
流—固—热耦合分析欠平衡井井壁稳定及井径扩大 ·····	李士斌 吴 晗 朱云伟 (61)
深水多梯度钻井原理及仿真分析·····	殷志明 盛磊祥 蒋世全 (68)
深水固井水泥浆实验模拟技术·····	屈建省 王友华 高永会 (75)
吉林油田套管钻井技术与应用·····	阳文发 王 力 张嵇南 (83)
深水钻井水力参数设计推荐方法·····	孙腾飞 高德利 张 辉 (91)
深水井测试的主要风险及安全控制技术研究·····	何玉发 姜 伟 蒋世全 (97)
二氧化碳在非常规油气藏开发中的应用·····	王瑞和 倪红坚 沈忠厚 (105)
粒子冲击钻井钻头设计及喷嘴数值模拟·····	徐依吉 赵 健 刘 芬等 (113)
激光钻井破岩技术及其发展·····	杨增辉 易先中 曹良波等 (120)
新疆浅层超稠油 SAGD 双水平井钻完井关键技术研究与应用 ·····	杨明合 张文波 夏宏南等 (130)
三维井眼轨道设计模型及其拟解析解·····	鲁 港 余 雷 夏泊沔 (137)
控压钻井技术适用性研究·····	韦海涛 周英操 杨 慧 (147)
控压钻井多级分层智能控制策略设计与实现·····	杨雄文 周英操 方世良等 (155)
控压钻井技术研究·····	伊 明 陈若铭 杨 刚 (163)
气体钻井技术应用与发展·····	徐 欣 宋生印 杨 龙等 (173)
空气钻井条件下钻柱振动特性研究·····	徐鸿志 王瑞和 宋有胜 (181)
气体钻井井斜影响因素分析·····	闫 铁 孙士慧 毕雪亮等 (190)
克拉美丽气田欠平衡钻井地层适应性评价·····	夏宏南 文 涛 (197)
新疆油田井下安全阀技术分析·····	李晓军 宁世品 程召江等 (203)
同轴旋转双射流结构与特性实验研究·····	熊建华 李根生 马东军等 (207)
围压条件下井底磨料射流破岩的试验研究·····	倪红坚 杜玉昆 张树朋等 (213)
核磁共振技术在随钻测井中的应用·····	毛为民 (219)
随钻声波信息传输系统及其研究进展·····	高文凯 (224)
地质导向钻井轨道设计方法·····	唐雪平 苏义脑 王家进 (229)

基于 DDS 技术的随钻电磁波电阻率信号发射模块设计	张程光 贾衡天	(237)
电磁波电阻率测量系统设计	贾衡天 邓 乐 张程光	(243)
电磁随钻测量系统(EM-MWD)地面信号接收的研究	弓志谦 李 林 彭烈新等	(248)
气体钻井井下发电机涡轮驱动器的设计与实验	王 磊 李 林 张连成等	(255)
非恒定摩阻对连续脉冲信号频率响应的影响分析	纪国栋 王 翔	(262)
基于 ANSYS 的松耦合变压器传输效率的研究	谢海明 李永振	(269)
MGT 导向技术在 SAGD 双水平中的应用及研制	陈若铭 陈 勇 罗 维	(275)
ϕ 311 自动垂直钻井系统技术探讨	艾才云 穆总结 宋朝晖等	(280)
带轨迹测量功能的 PWD 系统研制	周 强 赵宝忠 徐新组等	(287)
开展油套管适用性评价, 确保油气井管柱安全	宋生印	(293)
仿射坐标系在钻柱动力学中的应用	冯光通 唐 波	(299)
内外压强对油井管柱等效轴向力及稳定性的影响	李子丰	(315)
泥页岩井壁稳定耦合理论研究现状分析及建议	王 倩 周英操 刘玉石	(320)
各向异性地层中井孔周围应力场的研究	崔 杰 焦永树	(327)
裂缝地层随钻段塞防漏技术研究	李家学 黄进军 高 峰等	(337)
裂缝性漏失桥塞堵漏技术实验研究	王 贵 蒲晓林 陈光斌等	(343)
低孔低渗煤层气储层伤害评价方法探讨	赖晓晴 屈沅治 张晓波等	(351)
自由水络合剂作用机理及低自由水钻井液体系研究	张 岩 向兴金 鄢捷年等	(358)
超细粒子对钻井液基本性能影响的研究	曹晓春 李艳钰 刘宪红等	(365)
智能完井技术研究初探	余金陵 魏新芳	(370)
地层封隔完井工艺及工具	齐月魁 单桂栋 聂上振等	(379)
吉林油田抗 CO ₂ 腐蚀固井技术	王顺利 何 军 张嵇南	(391)
影响胶乳水泥性能的因素研究	王 毅 彭志刚 陈大钧	(404)
耐盐胶乳水泥浆体系室内研究	曾建国 孙富全 李鹏晓等	(409)
第三代储层欠平衡钻井技术——精细控制的全过程欠平衡钻完井	孟英峰 李 皋 陈一健等	(417)
不同钻井方式下井底应力场研究	石祥超 孟英峰 李永杰等	(427)
气体钻井井壁失稳因素分析研究	罗 华 李永杰 孟英峰等	(433)
气体钻水平井井径扩大环空流动特征数值模拟	魏 纳 孟英峰 李孝军等	(440)
欠平衡钻井随钻储层监测评价技术及展望	孟英峰 李 皋 陈一健等	(448)
实时在线对钻进效率进行优化及评价	杨 谋 孟英峰 李 皋等	(456)
稀土合金钢的 CO ₂ 腐蚀行为研究	万里平 孟英峰 李永杰等	(464)
RDM 技术及其在深水钻井中的应用	陈颖杰 金 衍 陈 勉等	(470)
干井筒固井对水泥浆性能及岩石稳定性影响	冯颖韬 徐璧华 刘 扬	(480)
灰色关联度分析法在固井质量影响因素分析中的应用	周云丰 杨远光 许可一	(486)
井下工程参数随钻测量系统	马天寿 陈 平 何 源等	(492)
裂缝性储层井控技术体系探讨	刘绘新 李 锋	(501)
钻井液膜对钻杆的腐蚀机理研究	刘婉颖 施太和 曾德智等	(508)

破碎性地层坍塌压力计算初探·····	何世明 姚如钢 梁红军等	(516)
气体钻井地层出水随钻定量监测·····	汤 明 何世明 唐继平等	(521)
气体钻井与钻井液钻井全井段钻柱动力学对比研究·····	林铁军 练章华 魏臣兴	(527)
热采井固井铝酸盐水泥石耐高温性能及机理研究·····	李早元 武治强 谢 鹏等	(534)
深井压差卡钻机理研究·····	熊继有 王国华 卢 虎	(540)
深水表层导管安装方法及风险控制技术研究·····	朱荣东 蒋世全 周建良等	(545)
深水工程师法压井参数计算模型研究·····	张 智 肖太平	(553)
深水钻井钻井液中气体溶解度计算·····	付建红 黄贵生 许亮斌	(559)
油井封堵及暂闭用镁氧水泥的研究·····	李早元 靳东旭 葛红江	(565)
直井钻遇单条裂缝的漏喷同存模型研究·····	舒 刚 孟英峰 李 皋	(572)
智能 MRC 钻完井的理论与技术 ·····	张绍槐 熊继有	(580)
钻井液抗高温降失水剂 SMP 的合成新工艺及性能研究 ···	白小东 蒲晓林 姚 雯	(589)
钻井液组分对泥页岩强度影响·····	张冬明 黄进军 冯宗伟等	(597)
深水表层钻井井下复杂情况随钻监测技术研究·····	张 杰 陈 平 毛良杰	(602)

利用射流改进井底流场的研究

杨永印¹ 裴建忠² 孙伟良³ 路飞飞¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院; 2. 胜利石油管理局
黄河钻井总公司; 3. 胜利石油管理局钻井工程技术公司)

摘 要: 本文研究了喷嘴入口结构参数对旋转射流特性的影响及其在淹没条件下的破岩效果。旋转射流具有离心流动特点, 射流中心压力较低, 诱发空化现象降低压持效应, 可以提高破岩效率。旋转射流具有强大的冲击力, 其速度场具有较强的切向速度分量, 对改善井底流场, 清洗岩屑和冷却钻头可以起到积极的作用。

关键词: 喷嘴 旋转射流 压持效应 数值模拟 破岩

高压水射流破岩辅助钻井技术是提高深井、硬地层钻速的有效途径之一, 同时高压水射流可用来单独破岩, 钻出具有特殊结构和用途的井眼。理论和实验研究表明, 旋转射流的强扩展能力可以增加冲击面积。目前旋转射流已经成功应用于辽河、胜利、江苏等油田的径向水平井的水力钻进。旋转射流具有离心流动特点, 射流中心压力较低, 从而诱发空化现象增强破岩能力。此外旋转射流的速度场具有较强的切向速度分量, 对改善井底流场、清洗岩屑和冷却钻头可以起到积极的作用。旋转射流的扩展角大于锥形喷嘴射流, 能够增加井底的清洗面积和清洗效果, 单独钻进可钻出相对大直径的孔眼。切入式旋转射流喷嘴具有特殊的旋流引入结构, 研究其影响程度, 对实际应用十分必要。

1 切向导入式旋转射流数值模拟

1.1 喷嘴内及射流流场计算模型的建立

应用 FLUENT 软件模拟旋转射流的流场, 因为射流流体的速度在各个方向上的分量都不为零, 故射流流场和喷嘴采用三维建模。喷嘴模型参考 PDC 钻头喷嘴尺寸建立, 出口直径 16mm, 切向入口形状不变, 数量改变时通过调节其轴向长度来保证切向入口导流面积

创新项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助。

作者简介: 杨永印(1962—), 男, 博士, 教授, 现任中国石油大学(华东)高压水射流研究中心常务副主任, 水射流技术专业委员会秘书长, 主要从事油气井工程流体学与工程、高压水射流理论与技术及工程应用等教学与研究

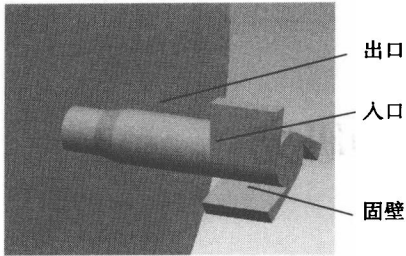


图1 喷嘴流道三维结构模型

相同。为了接近井底尺寸,模型采用长度 100mm、直径 200mm 的圆柱体。应用 PRO/e 建立模型如图 1 所示。

1.2 求解模型

采用标准 $k-\varepsilon$ 模型求解紊流场,控制方程包括连续性方程、动量方程以及 k , ε 方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \left(\eta \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right)}{\partial x_j} \quad i, j=1, 2, 3 \quad (2)$$

式中, v 为紊流时均速度; ρ 为流体密度; p 为流体压力; η 为流体的动力黏度; $-\rho \overline{u_i u_j}$ 项为雷诺应力或紊流应力。

雷诺应力项需要补充下面的 $k-\varepsilon$ 两方程模型来封闭以上的动量方程。

根据 Boussinesq 假设:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{i,j} + \eta_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \eta_t \delta_{i,j} \text{div} \vec{V} \quad (3)$$

式中, k 为紊流动能; η_t 为紊流黏性系数。

湍流动能方程 k 和耗散方程 ε 分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5)$$

式中, G_k 是由层流速度梯度而产生的湍流动能; G_b 是由浮力产生的端流动能; Y_M 是在可压缩湍流中, 过度的扩散产生的波动; C_1, C_2, C_3 是常量; σ_k 和 σ_ε 是 k 方程和 ε 方程的湍流 Prandtl 数。

湍流速度: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, 其中 C_μ 是常量。

模型常量: $C_{1\varepsilon}=1.44$; $C_{2\varepsilon}=1.92$; $C_\mu=0.99$; $\sigma_k=1.0$; $\sigma_\varepsilon=1.3$

1.3 淹没条件下旋转射流的仿真模拟

边界条件为喷嘴入口和上返环空出口设为模型的压力入口和出口, 压力降为 7MPa; 壁

面条件为无穿透, 无滑移。

1.3.1 喷嘴内外流场特性分析

为对比分析旋转射流的流场特性, 分别模拟了相同条件下 2、3、4 个切向导入口的旋转射流和无切向导入口的直射流流场。入口条件对喷嘴上游产生旋流的影响, 见图 2。

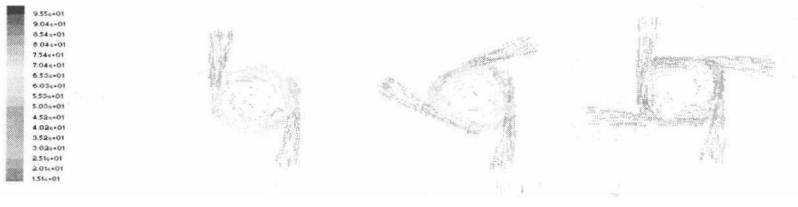


图 2 不同切向导入口条件下旋流产生对应的速度分布比较

由图 2 可知, 流体进入各切向入口后形成旋转流动, 入口数量越多, 旋流越均匀。图 3 说明, 切向导入口的数量对射流扩散角及流速分布影响不大, 射流扩散角范围 $14^{\circ} \sim 17^{\circ}$ 。此外, 旋转射流扩散角明显大于直射流 (约 8°), 井底漫流区域以及漫流层厚度也大于直射流。

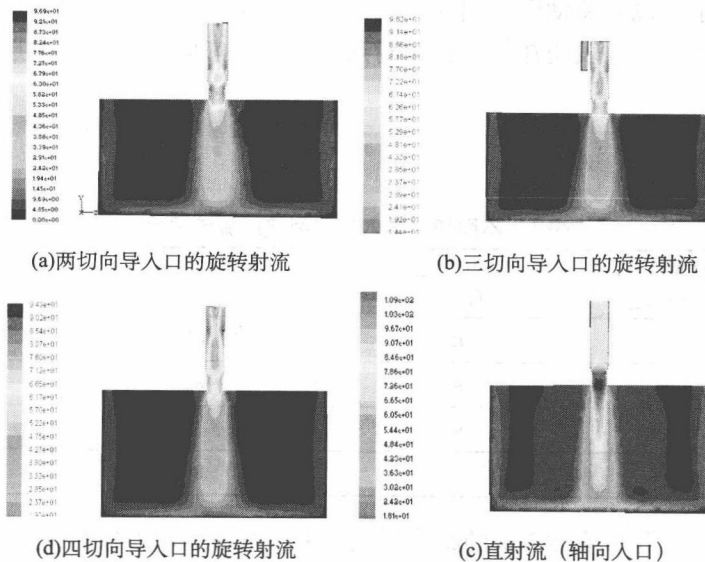


图 3 旋转射流与直射流的速度等值线图比较

1.3.2 入口条件对射流旋流强度的影响

旋流强度是表征射流旋转程度的无量纲。以喷嘴出口处的射流速度分布为标准, 计算射流的旋流强度, 从而考查入口条件对旋流的影响。通过对 3 个入口条件下的模拟结果, 得到喷嘴出口处的切向速度和轴向速度分布曲线, 见图 4。

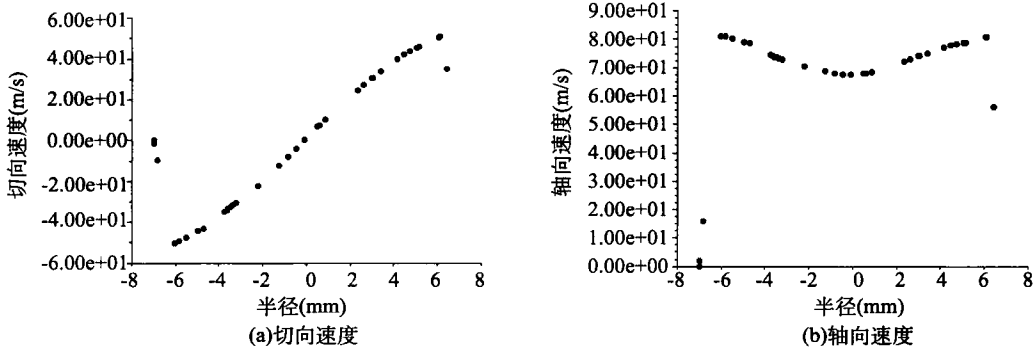


图4 三导向注入口喷嘴出口处的切向速度和轴向速度分布

根据模拟结果采用喷嘴出口的速度分量，将最大切向速度和轴向速度带入公式 $S' = \frac{\bar{w}_{\max}}{\bar{U}_{\max}}$ ，得到不同注入口条件下的射流旋流强度，得出射流旋流强度，见表1。由表1可知，短喷嘴均为强旋流，切向导入口数量越多，旋流强度具有增大的趋势，增加幅度低于5%。这是由于切向速度变化不大，而轴向速度变小，故旋流强度相对增大。导入口数量增多，轴向速度减小，说明流动阻力增大。喷嘴长度加倍时，旋流强度降低，说明喷嘴长度对旋流的影响显著。图4表明注入口数量对射流扩散角影响不大，故可选用3个切向导入口结构的喷嘴。

1.3.3 旋流对喷嘴流量系数的影响

表1 不同切向导入口时射流的旋流强度

速度特征 喷嘴形式	最大切向速度 (m/s)	最大轴向速度 (m/s)	旋流强度
2入口	55	86	0.64
3入口	54	82	0.66
4入口	54	78	0.69
3入口，长度加倍	25	80	0.31

喷嘴流量系数主要与喷嘴流道的结构形状有关，对钻头水力参数设计十分重要。

已知模拟所用的喷嘴压降 7MPa，数值模拟可得喷嘴出口处的平均速度 v_a ，代入公式：

$$\begin{cases} Q_a = CQ_t \\ \Delta p = \frac{1}{2} \rho v_t^2 \\ (Q_a, Q_t) = \pi D^2 (v_a, v_t) \end{cases} \quad (6)$$

式中， v_a 、 v_t 为数值模拟喷嘴出口射流平均速度和理论平均速度，m/s； Δp 为喷嘴压降，Pa； C 为喷嘴流量系数。

由表2可以看出，切向导入口越多，喷嘴流量系数越小，直射流喷嘴流量系数大于旋

转射流喷嘴, 因此, 旋转射流喷嘴要想在相同喷嘴压降下得到与直射流喷嘴相同的流量, 可适当增加喷嘴的直径。

表 2 不同切向导入口的旋转射流和直射流的流量系数

喷嘴形式	平均速度 (m/s)	流量系数
2 切向导入口	80	0.68
3 切向导入口	74	0.63
4 切向导入口	71	0.60
直射流喷嘴	112	0.95

2 射流破岩实验比较

射流破岩实验是确定射流破岩能力的最直接手段。通过单位时间内射流的破岩直径、深度及体积说明及比较得到射流破岩能力, 以及喷嘴几何参数的影响。

2.1 非淹没条件下射流形态对比

非淹没条件下, 旋转射流的扩散角明显大于直射流, 具有更大的冲击面积。由于旋流存在, 射流中心出现一个低压区, 在淹没条件下很容易产生流体空化, 这也是旋转射流切割或钻孔门限压力比较低的重要原因。

2.2 相同排量下的冲岩试验

岩样的配料水泥: 砂为 1: 3, 抗压强度 42MPa, 其力学性质相当于中硬砂。实验排量 160L/min, 冲蚀时间 4min, 喷距 28mm (4 倍喷嘴出口直径)。由于旋转射流喷嘴流量系数小于直喷嘴, 旋转射流的喷嘴压降约为 9.5MPa, 高于直射流的喷嘴压降 7.2MPa 左右, 这与前面数值模拟得出的规律一致。实验效果见图 5 和表 3。

表 3 中破碎直径为主体坑的直径, 破碎体积采用充填法测得, 包括了破碎坑边缘冲蚀掉的部分。

表 3 说明, 相同排量和实验喷距下, 旋转射流冲击面积大于直射流的 3 倍, 破碎体积为直射流的 5 倍。三个数据指标都表明旋转射流的破岩效果远远好于直射流。旋转射流喷嘴的压降高于直射流, 说明喷嘴产生旋流导致的阻力较大, 与数值模拟结论一致。

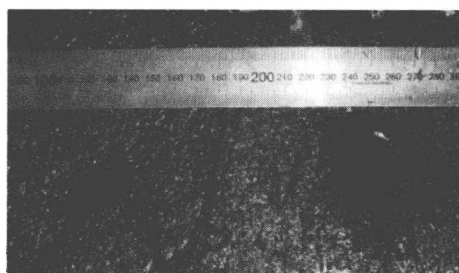


图 5 相同排量下, 旋转射流和普通直射流实验效果对比图

表 3 相同排量下旋转射流与直射流破岩效果对比

射流类型	破碎直径 (mm)	破碎深度 (mm)	破碎体积 (mL)
旋转射流	47.6	21	25
直射流	15	13	5

2.3 相同压力下的冲击实验

采用与上相同配料的岩样，旋转射流和直射流喷嘴压降同为 7MPa，喷距 28mm，冲蚀时间 5min。实验效果见图 6，其中粉笔标志的区域为直射流的冲击目标，无明显冲蚀痕迹；图中的破碎坑为之后旋转射流产生。

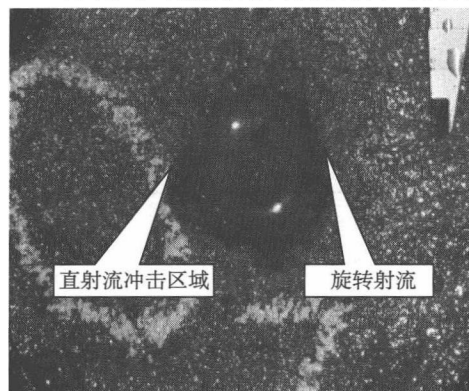


图 6 相同压力下旋转射流和普通直射流冲击效果

图 6 和表 4 说明，旋转射流破岩的门限压力低于直射流，这与叶轮导向式旋转射流的破岩特点相同。在喷嘴压降为 7.2MPa 时，直射流可以使岩样破碎（图 6），而压降为 7MPa 时无破碎坑出现。这说明直射流破碎该岩样的门限压力用喷嘴压降表示时大于 7MPa 而低于 7.2MPa，旋转射流破碎该岩样时的门限压力低于 7MPa。

表 4 相同压力下旋转射流与直射流破岩效果对比

射流类型	破碎直径 (mm)	破碎深度 (mm)	破碎体积 (mL)
旋转射流	53	17	15
直射流	—	≈ 0	≈ 0

3 结论

(1) 通过数值模拟，得出了切向入口数量等结构参数对射流强度和喷嘴流量系数的影响。旋转射流扩展角远大于非旋射流。切向入口数量对射流的旋流强度影响不大，喷嘴长度对射流的旋流强度影响显著，实际应用中应尽量缩短喷嘴长度。

(2) 相同排量及相同喷嘴压降下的破岩实验得出，旋转射流的冲击面积远大于非旋射流，破岩效果明显优于非旋射流，其破岩的门限压力比非旋射流低。实验条件下，破岩直径和体积比非旋射流分别提高 2 倍和 4 倍。

(3) 旋转射流井底冲击力大同时具有较大的冲击面积，携岩能力强，并具有切向速度分量，能清洗其他射流清洗不足的地方，对改善井底流场、清洗岩屑和冷却钻头可以起到积极的作用。

(4) 旋转射流喷嘴的流量系数较低，相当于非旋射流喷嘴的 60% ~ 70%；实际应用中可相应增大喷嘴直径来达到必需的喷嘴流量。

参 考 文 献

沈忠厚. 水射流理论与技术 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1998.

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], 石油钻探技术, 2002, 30 (5): 15-16.

Yang Yongyin, et al. Experiments on negative pulse jetting assisted drilling [C]. Proc. of PRICWJT, Qingdao, 2006.

杨永印, 沈忠厚. 旋转磨料射流破岩钻孔试验研究 [J]. 石油钻探技术, 1999, 27 (4): 4-7.

杨永印, 王瑞和, 周卫东, 等. 旋转射流破岩钻孔机理研究 [J]. 中国安全科学学报, 1999, 9 (专刊):

杨永印, 杨海滨, 沈忠厚, 等. 磨料浆体旋转射流破岩钻孔特性实验研究 [J]. 中国石油大学学报, 2005, 29 (3): 45-48.

杨永印, 王瑞和, 沈忠厚, 等. 聚丙烯酰胺浆体旋转射流速度分布的实验研究 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2001, 25 (6): 38-41.

杨永印, 杨海滨, 王瑞和, 等. 超短半径辐射分支水平井钻井技术在韦 5 井的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2006, 28 (2): 11-14.

韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用介绍 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 1-20.

Yang Yongyin. Rock drilling with abrasive suspension swirling jet and effects of additive polyacrylamide [C]. Proc. of 2005 American Waterjet Conf. Houston, Texas, 2005.

吴宗泽. 机械设计实用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.

王文玟. 喷嘴加工的几个问题 [J]. 高压水射流, 1984, 19 (3).