

喷射钻井 理论与计算

张绍槐 编著

石油工业出版社



28464

喷射钻井理论与计算

张绍槐 编著



S724/23
152/44/31



200434048

石油工业出版社

内 容 提 要

本书阐述分析了喷射钻井各水力因素之间的内在关系和工艺技术发展规律。从理论和生产实际方面分析了水力能量的合理传递、分配与计算方法；用试验架试验研究成果，从理论上阐述了影响喷射钻井净化井底、水力破岩和环空携岩的基本因素、机理和技术措施；介绍了试验架研究射流水力特性、井底流场等方面的最新科研成果和工业试验情况。全面分析阐述了喷射钻井最优工作方式的理论 and 应用，拟定了喷射钻井几种典型的水力设计程序，编写了用电子计算机计算的框图。本书可供石油、地质、矿业类大专院校钻井等专业教师、研究生、本科生、专修科、短训班等使用，也可供石油科研部门、油田现场钻井、泥浆等工程技术人员学习参考。

责任编辑：段云舫 封面设计：伟 君

喷射钻井理论与计算

张绍槐 编 著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

通县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 11印张 268千字 印1 —1,200

1986年9月北京第1版 1986年9月北京第1次印刷

书号：15037·2650 定价：2.30元

科技新书目：135-190



序

喷射钻井工艺技术是我国目前和今后一个相当时期内提高钻井速度、降低钻井成本的重要技术之一。为了适应技术进步和智力开发的要求；为了适应钻井生产、科研的发展；为了满足院校教学和技术培训的需要，我把近年来在学院讲授喷射钻井课程、指导研究生、办喷射钻井技术培训班和教导队以及科学研究和出国考察、学术交流的收获等加以总结写出这本书。拟将本书做为研究生、助教进修班和大学本科生的试用教材和对油田钻井技术干部进行培训的材料。

本书分析述评了国内外喷射钻井的发展简史、现状和未来。用钻井水力学、泥浆流变学、环空水力学等基础理论，从理论方面和生产实际方面分析了水力能量的合理传递、分配与计算方法。对喷射钻井的科学原理进行了论述。指出了喷射钻井各水力因素的单项意义和相互之间的内在联系。本书有本人及国内近年来在理论上和试验架试验研究上的最新成果。从理论上、实验室试验和工业生产试验等方面阐述了影响喷射钻井净化井底、水力破岩和环空携岩的基本因素、机理和技术措施；介绍了试验架研究射流水力特性、井底流场等方面的最新科研成果和工业试验情况。本书结合泥浆泵的工作状态、调速性能等全面分析阐述了喷射钻井最优工作方式的理论 and 应用，系统地给出了数学计算公式，针对国内钻井界在喷射钻井认识上一些有争议的问题进行了分析述评和必要的澄清。书中拟定了喷射钻井几种典型的水力设计程序并编写了相应的用电子计算机计算的框图。在分析研究国内外文献资料时，以研究解决我国生产实际问题为指导思想。书末列出主要参考文献便于读者查阅、检索。

本书由刘希圣教授主审并得到他的指导；在编写过程中得到我的助手、硕士学位获得者徐华义和我指导的研究生姚彩银等同志的帮助，在此一并致谢。

限于本人水平和时间仓促，难免有错误之处，敬希读者指正。

张 绍 槐

1984年3月于西南石油学院

目 录

第一章 总论	(1)
第二章 喷射钻井的基本原理	(11)
一、水力能量的传递与分配	(11)
二、射流的特性、作用与要求	(12)
三、喷嘴的结构及其水力特性	(26)
四、喷射钻井的基本概念	(34)
五、喷射钻井基本水力参数的计算	(36)
六、基本水力参数的实测与应用	(41)
第三章 泥浆流变学与环空水力学在喷射钻井中的应用	(44)
一、泥浆的流变性	(44)
二、与喷射钻井相适应的泥浆流变特性	(47)
三、适宜于喷射钻井的泥浆体系	(50)
四、低返速携岩机理	(51)
五、井壁稳定与流态判别	(57)
六、井眼净化的计算	(61)
七、循环系统压力损耗的计算	(65)
第四章 井底流场与井底净化的试验研究	(74)
一、概论	(74)
二、液流在井底场流动的研究	(74)
三、排屑能力的试验研究	(86)
四、井底流场物理特性的研究	(90)
五、喷射钻头的井底流场设计和单喷嘴钻头的井下工业试验	(94)
第五章 水力破岩的机理与应用	(103)
一、水力破岩的可能性与现实性	(103)
二、水力破岩的机理与应用	(106)
三、新型射流在钻井中的应用及展望	(107)
四、喷射距离对新型射流破岩体积的影响	(111)
第六章 喷射钻井最优工作方式的理论及应用	(114)
一、泥浆泵的工作状态	(114)
二、喷射钻井最优工作方式的理论及其分析	(115)
三、泵的调速性能与水力程序的关系	(127)
四、临界井深	(132)
五、最优喷嘴当量尺寸(d_{eq})的计算	(133)
第七章 喷射钻井水力程序设计	(135)
一、水力程序设计的根据与原则	(135)
二、常用的几种水力设计程序	(136)
三、应用水力计算尺的水力设计程序举例	(149)

四、用电子计算机进行水力程序设计简介	(151)
第八章 喷射钻井在我国的发展与今后技术要点	(152)
主要符号	(157)
我国法定计量单位及与其它单位的换算	(159)
参考文献	(165)

第一章 总 论

喷射钻井工艺技术是我国目前和今后一个相当时期内提高钻井速度、降低钻井成本的重要技术之一,这一新技术已列为我国“六·五”及“七·五”期间石油工业重大科技推广项目之一。早在三十年代国外就开始研究喷射钻井工艺,到六十年代喷射钻井在国外已发展成为钻井技术上的重大成就之一。这一理论和技术直到八十年代还在不断进行研究和向现代化水平提高。

喷射钻井的发展大致可分为下述三个阶段:

第一、喷射钻井的萌芽阶段——1930年到1947年;

第二、喷射钻井的发展阶段——1948年到1968年;

第三、喷射钻井的现代化阶段——1969年以后。

一、喷射钻井的萌芽阶段

开始使用旋转钻井时,钻头对岩石只是进行机械破碎。钻头水眼只是循环通路,循环液只起清洗、冷却钻头、携带岩屑、润滑井壁等作用。在三十年代初期,水射流技术在冲土和水力采煤中首先得到了应用,从而引起了石油钻井技术界的重视。钻井工作者们从水力采煤和水射流冲土的水力破岩作用联想到怎样在旋转钻井中把水力破岩作用和机械破岩作用结合起来。这样,美国在1938年开始研究水力喷射式钻头。先得到发展的是喷射式刮刀钻头,随后也在普通铣齿三牙轮钻头上进行试验。开始试验喷射钻头时的做法是加大排量而在很长时间内没有认识到应该缩小喷嘴直径和提高喷射速度。加大排量后泵压升高又受到当时机泵条件的限制;同时加大排量后,环空返速也随之增大,泥浆对井壁的冲刷加重,有些松软地层的井段可能造成井壁垮塌,这种井壁不稳定的情况也制约了从提高排量来提高水射流冲洗效果的可能性。加大排量而出现的上述种种问题限制了喷射钻井的实现,这样约有十年之久使喷射钻井没能得到成功,甚至一度中断了试验。经历了十年徘徊使人们认识到加大排量是错误的。

1947年喷射钻井在萌芽阶段取得突破的一年。1947年美国的汉布尔(Hamble)石油公司研究所开始着手研究刮刀钻头的水眼喷射速度并第一次提出要在设法提高喷射速度上想办法。汉布尔公司组织了一个钻井队进行喷射钻井试验,用小直径喷嘴提高了喷射速度从而明显地提高了机械钻速,这就引起了许多钻井承包商的注意。当时许多大的石油公司和钻井承包商纷纷参加了刚成立的喷射钻井协会以研究喷射钻井的原理与应用问题。随着喷嘴直径的减小,泵压的提高,机泵功率显得不足了,当时就开始从提高机泵功率方面做工作,在1947年出现了551.6千瓦(750马力)的泥浆泵。此后机泵能力的不断提高又促进了喷射钻井的发展。

二、喷射钻井的发展阶段

拉默斯(Lummus J.L.)把1948~1968年称为科学化钻井阶段^[98]。他指出这一时期钻井

工作者们较好地认识了钻井的水力原理。这一时期喷射钻井在理论和实践上的发展是科学化钻井阶段的主要技术成就之一。

在美国得克萨斯和海湾地区到1948年4月,用喷射刮刀钻头进行了26口井的试验,第一次取得了大面积的成功,试验初步证明钻速的增加与喷射速度成正比。

国外第一篇关于喷射钻井的论文是1948年汉布尔公司的诺利(Nolley J.P.)在美国石油学会年刊(A.P.I.)上发表的《水眼喷射速度对钻速的影响》。1949年诺利又发表了《水力因素影响刮刀钻头钻速的分析》,在钻井文献中首先提出了“水力因素”这个基本概念。

用较小尺寸喷嘴的喷射刮刀钻头试验成功之后,很快又用小喷嘴喷射牙轮钻头进行了试验。1948年美国史密斯(Smith)钻头公司就试制了第一只长喷嘴双牙轮试验钻头。顺便指出,直到1976年史密斯公司才制成商品批量生产的A-1型喷射双牙轮钻头,而且是世界上最早的同类商品。可见一种新概念的出現到发展是要经过较长的时间和大量试验研究的。1949年美国开始试用喷射三牙轮钻头。早期的现场试验证明喷射牙轮钻头可较非喷射普通牙轮钻头提高钻速50%以上。

五十年代初期就已经逐步形成了喷射钻井工艺技术的概念。1950年坎农(Cannon G.)等提出《影响牙轮钻头钻速的报告》。1950年前后开始考虑喷射钻井水力因素的选择和水力程序这一重要问题,在1950年就开始做了水力计算图表并开始搞水力计算尺。

1951年埃克尔(Eckel J.R.)等初步进行了喷嘴结构的研究并实验了喷嘴直径、喷距、喷速等对钻速和泵工作性能的影响,发表了《喷嘴的设计及其对钻速和泵工作的影响》一文〔49〕。

1952年赫卢姆斯(Hellums)发表了《泵的水马力及其对机械钻速的影响》。1953年汤普逊(Thompson)发表了《在加利福尼亚州钻井中水马力的应用》一文。这些文章表示当时已重视了水功率的利用并初步认识到钻头水功率的重要性。为此,在1953年美国石油学会(API)组织了一个喷射钻井水马力利用的专题研究委员会,于1956年提出报告,其主要结论是:

(1)在井下安全的前提下,尽量降低环空返速并认为0.51~0.72米/秒(100~150英尺/分)的返速是安全可用的;

(2)喷射钻头必须用缩小喷嘴尺寸的方法提高喷速,最低喷速为58~60米/秒(190~200英尺/秒);

(3)喷射钻头在软地层效果最好,在当时机泵和工艺技术条件下并未找到喷射速度的上限;

(4)增大钻头水功率和钻压,钻速也相应得到提高;

(5)两泵串联比并联更好。(这是因当时机泵功率小,泵额定压力低,两泵串联工作可以提高泵压)。

虽然这是五十年代喷射钻井实践中提出的问题和当时的认识,但是,这些主要结论表明当时已认识到实现喷射钻井应遵循缩小喷嘴尺寸、提高喷速、降低排量、降低环空返速、提高泵压和水功率等基本原则。在五十年代末期就已经初步形成了钻井水力学、钻头水力学、环空水力学的理论概念和实验研究。这些理论上的提高大大推动了喷射钻井的发展。1957年美国喷射钻头的进尺已占钻井总进尺的33%。

1958年穆尔(Moore P.L.)发表了《影响机械钻速的五种因素》一文,提出了水力参数对钻速影响的最优化钻井技术并建立了初步的数学方程和水力计算图表。从这之后美国几个钻

头公司(休斯、瑞德、史密斯)和阿莫柯公司等相继做出了水力计算图板。

为了认识喷射钻井的机理,国外从五十年代后期六十年代初期以来,陆续开展了模拟的和全尺寸的喷射钻井实验架研究。1960年坎达尔(Kandall H.A.)和戈因斯(Goins W.C.)在《AIME》上发表了《最大水马力,最大冲击力与最大喷射速度的设计与应用》^[90]。这篇论文的突出价值在于明确提出了在一定的机泵条件下使泵功率得到合理的传递与分配,保证在钻头上最大可能地获得最大的水力能量这一基本原理,指出了应该在最优工作方式的原则下统一配套优选各个水力参数,对喷射钻井的实践和发展起了重要的指导作用。

在美国,喷射钻井是六十年代钻井速度上台阶(平均队年进尺从一万五、六千米提高到近二万米以上)的一项重要技术。例如1961年3月在美国南路易斯安那州用喷射钻井法钻的一口最快的井就已经创造了三天零八小时钻进3048米(一万英尺)的快速钻进指标,这个纪录几乎保持了二十年之久。

六十年代初就开始强调了净化井底的重要性。1962年万林根(Van Lingen)发表了《井底清洁是影响深井钻进的主要因素》一文。1963/1964年美、菲恩斯特(Feanstra)等发表了一篇以实验室钻进试验为根据的钻头水力参数对钻速影响的综合性论文。他的研究说明岩屑在井底的运移不仅受静压持效应的影响而且还有动压持效应的影响。他指出很低的射流速度只能从牙齿冲击井底的空隙处清洗未被压持的松散岩屑;而剔除在压差条件下被压持着的岩屑就需要较高的射流速度。

1964/1965年麦克莱恩(Mclean)^[110,111]发表了关于测试钻头底下纵向冲击和横向漫流的两篇文章。他的论文包括在一只直径为12厘米($4\frac{3}{4}$ ")钻头底下射流正对一个平滑井底的压力和速度的测量试验资料。他研究了漫流速度在井底的变化规律,并发现他的试验条件下,平行于井底的漫流最大速度约在距井壁1.5厘米(0.6")处;漫流流速剖面中最大水平速度发生在高度距井底0.4毫米(0.016")的距离处等等。他的研究工作说明当流量(Q)与喷射速度(V_0)的乘积为最大值时,射流的冲击压力和漫流速度都达到最大值。自那时起流量(Q)和喷射速度(V_0)这两个参数就逐渐被钻井工程师们公认为是能够控制钻头附近最佳净化效果的主要参数。

六十年代中期已注意到了钻头机械能量与水力能量的匹配以及提高钻头水功率必须继续发展大机泵等问题。例如1965年,米切姆(Mechem)与富尔顿(Fullerton)提出《最小钻头水马力与钻压、转速的关系》^[58],即第一个富尔顿图表(这个图表在1967年由富尔顿和小富尔顿加以完善)。在这一阶段进一步发展了大机泵。1966到1967年间美国研究制造成功三缸单作用泥浆泵。到1968年美国喷射钻头的进尺已占钻井总进尺的65%。

以上说明,从1948~1968年是喷射钻井在理论和实践上大大向前发展和提高的阶段。

三、喷射钻井的现代化阶段

拉默斯(Lummus)等人把1968/1969年做为钻井自动化阶段的开始^[98]。顺便说明,有些人认为1968年以后是科学化钻井阶段的继续和深入,不必提什么“自动化阶段”。在此暂且不讨论怎么划分钻井阶段的问题。国内外比较共同的认识是1968~1969年是钻井科学的理论与实践水平发展的又一个里程碑;在这一时期喷射钻井理论与工艺技术继续发展、完善,从而进入了喷射钻井的现代化阶段。这个阶段的钻井速度又上了一个台阶。以美国为例,1970年

的平均台年进尺为25848米,1971年为32236米,随后整个七十年代和八十年代初仍保持在平均台年进尺三万多米的水平。

苏联在发展井底动力钻具的同时也很重视喷射钻井的试验研究和发展。全苏钻井技术研究所于1977年至1981年在西西伯利亚、乌克兰、白俄罗斯、古比雪夫等不同地质条件下的各个地区进行了再度减小排量的钻井试验。他们认为使用水基泥浆时比排量宜用 $0.04 \sim 0.05$ 升/秒·厘米²,使用生物聚合物泥浆时比排量为 0.035 升/秒·厘米²。按这个比排量范围计算,相当于在215.9毫米($8\frac{1}{2}$ ")井眼中用 $14.6 \sim 18.3$ 升/秒的排量。苏联使用的排量(或比排量)甚至比美国还小;而我国目前在215.9毫米($8\frac{1}{2}$ ")井眼中一般使用的排量为 $22 \sim 27$ 升/秒,即比排量约为 1.3 升/秒·厘米²左右,有时甚至高达 $3 \sim 4$ 升/秒·厘米²。苏联西伯利亚地区从1972年起给井队配备大功率的Y 8-6 M泥浆泵,以代替原来的Y 8-4 泵和БрН-I泵。在1973年进行的喷射钻井试验,其喷嘴压降达 $11.76 \sim 13.72$ 兆帕(MPa)(即 $120 \sim 140$ 公斤/厘米²),流速为 $130 \sim 140$ 米/秒,泵压达 $18.62 \sim 21.56$ 兆帕($190 \sim 220$ 公斤/厘米²时),比泵压为 $14.70 \sim 16.66$ 兆帕($150 \sim 170$ 公斤/厘米²)时的钻头进尺提高了 $18 \sim 28\%$,钻速提高 $8 \sim 10\%$ 。

在喷射钻井的现代化阶段针对喷射钻井第二阶段在理论上和实践中提出的关键性问题进行了更加系统和深入的专题研究。这些研究工作既有许多实验室的全尺寸台架试验和模拟井下条件的实验室钻进试验又有许多现场井下试验工作,并积极发展了近代数学和计算机技术在这一领域中的应用,简述于下。

美、大陆石油公司萨特科(Sutko)在1971、1973、1975年连续发表了三篇文章^[136、137],介绍用传感器、应变杆和动态应变仪等常规力学实验仪器实验测量井底平面的压力分布和影响排屑力大小的因素等,他强调指出喷嘴尺寸、数目、喷距等对井底净化效果有显著影响。82年美、阿莫柯公司发表SPE11059论文《三牙轮钻头喷嘴直径对射流冲击力的影响》,认为在排量和喷嘴当量直径(或喷嘴总截面积)相等的条件下,大喷嘴到达井底的射流能量其排屑力小于小喷嘴者。用双喷嘴代替三喷嘴时射流到达井底的有效能量百分比值较大。

法国石油科学研究院在1976~1981年连续发表文章介绍用排屑量对比法和液流示踪物轨迹试验法等先进的试验方法试验研究井底流场和喷嘴布置方案,设计试制了直径为 $244 \sim 313$ 毫米($9\frac{5}{8} \sim 12\frac{1}{4}$ ")的反喷嘴钻头并取得工业试验成功的经验。

苏《石油业》杂志近年也多次发表了他们关于钻头喷嘴布置方案对井底清洗质量影响的研究论文^[7]。鉴于用全尺寸的地面试验架进行的试验研究工作还不能模拟井下的真实情况(尤其是页岩等塑性岩石),美国近年已在著名的盐湖城(Salt Lake City)钻井模拟研究实验室进行了有关钻头水力参数的模拟试验。1979年发表的论文《关于钻头水力参数的全尺寸模拟试验》是第一篇介绍在盐湖城用模拟井下条件的地面试验架研究喷射钻井水力参数的研究成果^[139]。试验证明为了防止钻头泥包和水力失调应该根据具体的地质和钻井条件确定和保证钻头上有足够的比水马力,而最优比水马力值与岩性、钻头尺寸、喷嘴尺寸与数目以及钻压等有关。

美国瑞德钻头公司(Reed Rock Bit Co.)82年发表了论文《软地层镶齿钻头水力参数净化变量对钻速的影响》^[47]。该试验也是在盐湖城钻井模拟试验室做的高压模拟试验。试验证明在一定机泵条件下使用组合喷嘴和改善钻头的水力净化参数是提高钻速、降低成本的有效途径,而且在高的超平衡压力和钻速慢的情况下,用减少喷嘴数目等方法来提高单个喷嘴的水功率值尤其有效。

为了实现和解决泵功率的合理传递与分配以及为了分析研究喷射钻井的井底水力参数等等,都需要准确地、定量地计算和预测钻进时整个循环系统和循环系统各部分的压力损失。循环系统压力损失的计算是一个十分复杂的问题。准确地定量计算就是一个十分困难的课题。鲍博(Bobo)^[35]和穆尔(Moore)^[114]是两位在给定排量时计算钻井循环系统压力损失并建立算法的早期研究者。自那时到现在许多研究者提出了许许多多用手算法、图表法、计算尺法及计算机法来确定多变量的泥浆循环系统中压力损失的数学方程和计算方法^[6,41]。由于井下条件、钻柱组合、泥浆性能、钻进参数等多种条件的变化,已有的多种计算方法或者过于复杂不具有通用性或者虽然简单但计算结果不够精确。为了解决通用性和准确性的问题,1982年美国阿莫柯公司的米尔哈姆(Millheim K.K.)等发表了SPE 11057一文,第一次提出了用循环系统网络模型算法来模拟求解钻井循环系统中各类压力损失问题。

1981年美国桑迪安国家试验室(Sandia National Lab)发表了论文《钻头水力分布的优选》^[67],文章介绍了用液流显像技术和液流示踪物轨迹试验法等先进试验方法研究PDC钻头的水力分布建立井底流场的数学分析模型进而优选钻头的水力设计。

近年我国也已着手研究喷射钻井井底流场、水力破岩、井底水力参数的计算与优选等许多基础理论和重大技术问题^[7,21]。1982年西南石油学院喷射钻井科研组通过实验室试验研究井底流场问题,提出了使用单喷嘴等组合喷嘴的喷射钻头。在四川、川中矿区用单喷嘴钻头取得井下试验的成功^[14,21]。这些方面的研究成果说明我国喷射钻井的科研工作在某些方面已接近世界先进水平。

喷射钻井现代化阶段是喷射钻井工艺技术在理论上和技术上更深入发展和继续完善的重要时期,在这一时期主要技术特点是:

(1)从六十年代后期以来,随着镶齿、密封滑动轴承钻头的不断完善和钻头质量的不断提高,而逐步地提高了钻压和转速;随着钻头机械破岩能量的增大就必然提出了相应增大钻头水功率等钻头水力能量以防止水力失调,使钻头的机械能量与水力能量相适应的问题。

(2)从喷射钻井的机理上来说,高喷速的射流不仅能够净化井底还有着一定的水力破岩作用,因而需要提高钻头水力能量级。在研究泵功率合理传递与分配的基础上,根据喷射钻井实践的要求不断地发展了大机泵,提高了泵的额定工作压力和泵功率^[1]。例如爱迪柯(Ideco)公司生产的T-1600三缸单作用泵,其功率为1176.5千瓦(1,600马力)、额定泵压为38.22兆帕(390大气压)。从而保证了钻头水功率和钻头机械能量的合理匹配问题。注意研究多种不同地区,不同钻井条件下的合理(经济)水功率或比水功率。总的来说比水功率不断提高。有时钻头比水功率达到1.14千瓦/厘米²(10马力/英寸²)。苏联秋明油田设计使用的比水功率最大为2.64千瓦/厘米²(23.2马力/英寸²)。钻头水功率最大达588~735千瓦(800~1000马力)。美国钻3000米左右深的井工作泵压经常在19.6兆帕(200公斤/厘米²)左右,在24.50~26.46兆帕(250~270公斤/厘米²)的泵压下钻进也不再是个别情况了。总之不断地强化了钻头水力能量。

(3)进入七十年代以来,随着优质不分散低固相聚合物泥浆的不断完善和泥浆固控设备与技术的不断改善以及非牛顿液流变学的发展,为喷射钻井优选水力参数工作更好地解决了洗井液的剪切稀释和应用低返速这两个重要问题。

(4)近十年来,随着钻井综合录井仪等钻井监测仪表和现代化钻井参数录井方法的发展

尤其是近年井下随钻测量(MWD)技术的突破,已经实现了定量研究喷射钻井各可变因素对钻进指标(速度、进尺、成本)影响的现代化方法^[21、41]。并能确定它们之间的函数关系,积累了钻井数据库,建立和应用钻速方程等数学模式,同时利用计算机分析处理喷射钻井的数据和资料对其多元变量进行优选,不断完善钻井程序库,利用卫星通讯等现代化的通讯联络方法实现了现代化的钻井程序设计,用现代科技发展了科学钻井的技术服务工作。

(5)在六十年代研究喷嘴结构和射流特性的基础上进一步讨论了井底净化和水力破岩问题。七十年代以来用流体力学的理论和实验方法研究了井底流场问题。美国、法国、苏联和我国都从喷嘴的数量、尺寸、方向、喷距、位置、组合方法和布置方案等方面研究了井底水功率的合理分布和有效利用问题,使用和发展了各种组合喷嘴、加长喷嘴、反喷嘴等新型喷射钻头。近年还在探索把空化射流和冲击射流等新型射流用来提高水力破岩效果的途径。我国从1978年以来也开展了井底流场的实验室台架试验研究并在现场进行了各种组合喷嘴和单喷嘴喷射钻头的井下工业试验并已初见效果^[14、21、23]。

(6)七十年代以来把喷射钻井与平衡压力钻井结合起来。例如美国普遍使用较低比重的泥浆和强化的固控技术,因而井眼液柱压力和地层孔隙压力之间的压差小,压差可控制到2~3.43兆帕(20~35kg/cm²)。另外,美国套管、钻杆尺寸型号多,便于选择,加上在井身结构和钻具尺寸配合方面的特点,使得环形空间尺寸较大。例如,美国在215.9毫米或250.8毫米(8½"或9⅞")井眼中,一般均采用114.3毫米(4½")钻杆,165.1毫米(6½")钻铤;而我们一般都采用127毫米(5")钻杆,177.8毫米(7")钻铤。加上泥浆流变性能上的差别,所以美国的泥浆循环压耗低,特别是环空压耗小,环空压耗占总泵压的比值一般小于10%。苏联也强调降低环空压耗并提出要实现每一千米井眼的环空压耗为0.196兆帕(2kg/cm²)。相比较而言,我国目前现场实际使用的环空压耗却偏大,每一千米环空压耗有时达0.392兆帕(4kg/cm²);环空压耗约占总泵压的10~15%。八十年代以来,国内外喷射钻井正进一步与最优化钻井技术相结合,水力参数的设计与优选已经跟优选其它钻井参数结合起来,普遍使用计算机优选程序。

喷射钻井的实践和理论研究证明喷射钻头不仅靠它的牙轮对岩石进行机械破碎而且它的喷嘴是一个水力机械。高速射流的水力能量不仅能净化井底的岩屑还具有直接破碎地层的冲刷作用。一般来说,在一定范围和条件下,喷嘴这个水力机械的水力能量越大,射流的净化作用与水力破碎作用也越好。这里指的一定范围和一定条件主要是指一定的机泵设备条件和钻井技术条件。

要提高钻头水力能量就必须发展大机泵。喷射钻井要求泥浆泵具有功率大、压力高、流量均匀、排液振动小、易损件寿命长、维护保养简单、机械效率高等特点。喷射钻井用机泵设备的近期发展主要有以下几方面。

一是钻机一般配备两台泥浆泵,在钻进时往往只用单泵钻进,而且单泵的排量和功率就可以满足喷射钻井水力设计的要求;配备双泵的目的是保证全井施工过程中,绝对不会因泵的故障而停钻并能满足处理复杂情况的应急需要。钻深井和复杂井时还要配备三台泵,例如钻深能力15000米的美国派克(Parker)201号钻机共配备了三台Continental Emsco FB-1600型三缸泵。

二是1966~1967年美国研究制造成功三缸单作用泵,它比双缸泵更能满足喷射钻井对泵性能的要求。在七十年代生产和使用最多的仍是双缸泵。八十年代以来生产和使用三缸单作

用泵的比例越来越增多。新型三缸单作用泵向长冲程(冲程长度大于216毫米)方向发展,这就使其体积更小、单位功率重量更轻、排液振动更小。

三是普遍采用液力传动。驱动泥浆泵的动力机功率要比泵大25%左右。海洋钻井平台使用的泥浆泵几乎全是电驱动的。陆上钻井设备的泥浆泵多数仍用柴油机驱动,但使用电驱动的已越来越多。例如前面说的FB-1600型三缸泵就是每台泵配两部G.E.752型735.5千瓦(1000马力)电动机驱动。苏联西伯利亚西部地区的新型BY-30003YK钻机也是电驱动的。

四是向大功率方向发展。根据统计分析,美国钻机配备泥浆泵的比功率,在六十年代的时候2501~3500米级是296.4千瓦/千米(403马力/千米);3501~5000米级是314千瓦/千米(427马力/千米);5001~7000米级是312.6千瓦/千米(425马力/千米);7001~10,000米级是289千瓦/千米(393马力/千米)。到了七十年代分别为302.3、322.1、317、299.3千瓦/千米(411、438、431、407马力/千米)。苏联钻机配备泥浆泵的比功率,在七十年代是307.4~303千瓦/千米(418~412马力/千米)。

曾分析统计了美国国内1977年陆地、旋转钻钻井设备一千八百多台,其中3000~4000米钻机共442台,配备的泵功率(N_p)如下:

$N_p \leq 662$ 千瓦(900马力)的211台,占47.8%;

$N_p = 662 \sim 1176$ 千瓦(900~1600马力)的220台,占49.8%;

$N_p = 662 \sim 926$ 千瓦(900~1250马力)的209台,占37.7%;

$N_p > 926$ 千瓦(1260马力)的60台,占13.5%;

$N_p \geq 1176$ 千瓦(1600马力)的11台,占2.4%。

最大的是1360千瓦(1850马力),马克思威尔-赫林-道里(Maxwell Herring Drily公司,钻深4,100米钻机。

美国在中东的钻机泵功率较大,最大的泵功率是1912千瓦(2600马力)登特(Dentay)T-18钻机,钻深3353米。巴赫姆(Bahram)自升式平台是打3658米的海洋钻机,其泵功率为2353千瓦(3200马力)。

这一千八百多台钻井设备中,6000米的钻机共95台,它们的泵功率可分三类:

(1) $N_p \leq 1463$ 千瓦(1990马力)的33台,其中最小的为735千瓦(1000马力)、882千瓦(1200马力),占34.7%;

(2) $N_p = 1471 \sim 1838$ 千瓦(2000~2500马力)的45台,占47.4%;

(3) $N_p \geq 1839$ 千瓦(2,501马力)的17台,最大的为2831千瓦(3850马力),占17.9%;

美国陆地钻井方面钻井深度7620~9144米的钻机中,泵功率最大的是:

(1) 彭罗德-道里(Penrod Drily)公司钻深7620米的47号钻机,其 $N_p = 3235$ 千瓦(4400马力);

(2) 罗福兰德-布罗司(Loffland Bros)公司32号钻机,配两台功率为1213千瓦的泵,即 $N_p = 2 \times 1213$ 千瓦 = 2426千瓦(3300马力);井深9159米的巴登一号井就是用这套设备钻的。

美国钻井承包商为了提高他们在美国国外其它地方的竞争能力,其泵功率最大的是:

(1) 在欧洲的福拉索(Forasol)1号钻机, $N_p = 2647$ 千瓦(3600马力);

(2) 在中东的塞迪拉姆-道里(Sediram Drily)公司13台钻井设备, N_p 均为2500千瓦(3400马力)

根据海洋钻井成本高的特点,为了提高钻速、缩短建井周期、降低钻井成本,美国用于海洋钻井的设备中泵功率比陆地钻机更大。突出的是:

(1)彭罗德-道里公司72号钻机(钻深9144米 $\times$ 114.3毫米(4 1/2")钻杆), N_p 为9375千瓦(12750马力);

(2)凯道尔(KeYdril)公司的一台钻机(钻深7620米 $\times$ 114.3毫米(4 1/2")钻杆), N_p 为4412千瓦(6000马力);

(3)彭罗德-道里公司有七台钻机,钻深9144米 $\times$ 114.3毫米(4 1/2")钻杆, N_p 均为4302千瓦(5850马力)。

五是向高压方向发展。这既是为了满足提高喷嘴压降从而提高钻头水功率的需要,又是为了降低实际工作泵压与额定泵压比值(从85~90%降到50~60%)从而提高泵工作寿命的需要。根据统计分析,泥浆泵的比压力,美国在六十年代的时候,井深2501~3500米级是7.15兆帕/千米(73大气压/千米);3501~5000米级是5.59兆帕/千米(57大气压/千米);5001~7000米级是4.8兆帕/千米(49大气压/千米);7000~10000米级是4.31兆帕/千米(44大气压/千米)。到了七十年代,分别提高到8.43、7.94、5.88和4.60兆帕/千米(86、81、60和47大气压/千米)。八十年代美国、苏联钻深小于5000米级的钻机所使用的新型泥浆泵压力已超过40兆帕(约400大气压),或者说比压力已达7.84~8.82兆帕/千米(80~90大气压/千米)。

六是不仅泵的功率大、压力高而且泵和泵易损件的质量日益提高,已经实现一口井不修泵的情况。尤其是海洋钻井时平台上工作人员少,钻井设备自动化程度高,泥浆泵由司钻在司钻操作室直接控制,平台上一概也不配备修泵人员,如果不得已要修泵、更换易损件而当班人员又抽不出力量检修时,就得临时请服务公司派人乘直升飞机到平台抢修,而这样的服务费用是比较高的。所以越来越重视提高泵及易损件的质量和寿命,目前质量好的活塞、拉杆的寿命已达一千小时左右,缸套寿命在三千小时左右。

以上情况说明:随着喷射钻井工艺技术的日益发展、提高,国外在钻井设备的功率分配问题上,近年来的方向是泵功率大大超过绞车功率。这种做法是因为绞车功率只是决定最大起重能力和最大可钻深度的,它决定着这套钻井设备能打多深的井;而泵功率则是决定着钻井速度和建井时间的,这就说明泵功率是决定钻头水功率大小的基础与前提,同时也是影响和决定钻速和建井周期的关键。从降低总成本的经济观点来说,提高机泵能力和分配更多的功率给泵是有益的。

提高机泵功率和额定泵压之后,要使泵的功率得到充分发挥还必须解决泵的高压配件、易损件和高压水龙带等问题,以及使用内平薄壁高钢级钻杆和新型钻杆接头等钻杆管材问题,否则泵压打不上去,机泵能力仍然发挥不出来。美国路易斯安那州在六十年代就创造了的三天上3048米(一万英尺)水平时,泵压始终保持在17.25~21.36兆帕(176~218大气压)。目前国外喷射钻井的实际工作泵压一般都能达到19.6~21.56兆帕(200~220大气压)以上,甚至个别达26.46~27.44兆帕(270~280大气压)^[23]。

在研究国外喷射钻井技术发展的历史时,注意分析提高机泵能力与强化喷射钻井主要水力参数之间的关系是很重要的。

顺便说明,国外在发展喷射钻井的基础上,从六十年代起美国就开始研究:在循环洗井液中混入一定数量砂粒并完全利用水力射流的喷射作用,而没有辅助的机械破碎工具进行机械破岩,来实现钻进的喷砂钻井法^[38]和高压冲蚀钻井法。七十年代以来高压冲蚀钻井法已经

有了很大的突破。美国有的文章预测这种钻井方法能在1985~1990年广泛用于生产实践中。但是第十届世界石油会议认为现代钻井方法在近期内不会有大变化。

美国壳牌石油公司在荷兰的试验研究指出：岩石类型和性质也影响水力喷射的冲蚀效果。岩石的性质，除岩石软硬外，岩石渗透性对水力喷射效果的影响很大。在荷兰的试验还表明高压冲蚀钻井法不仅在软地层能取得成功，而且在硬地层也有潜力^[121 86]。

美国埃克森(Exxon)开发研究公司与其它八家公司协作进行了多年试验研究。实验是用比较典型的软及硬的沉积岩岩样进行的，岩样的渗透率从0.1~3000毫达西。因为岩石的饱和度对射流的破岩效率有影响，所以岩样都先用盐水浸泡饱和。试验表明在硬而不渗透的岩石中其进尺速度比在渗透性岩石中低得多。实验使用一套专门设计的高压钻头实验设备，最高泵压可达98兆帕(1000大气压)，最大排量3.8升/秒。破碎由软到硬的不同岩石的喷嘴最低有效压降为14.7~78.4兆帕(150~800大气压)，喷速则必须超过190米/秒。试验钻头有8~16个直径为1.0~1.2毫米的喷嘴，并从钻头中心按辐射方向径向排列成互为120°的三列^[1]。当喷嘴压降超过破碎岩石最低有效压降后，钻速明显增大，压降值超过得越多，钻速增长得也越多。对不同的岩石，压降对钻速的增长率是不同的，最高可达约3米/时/兆帕(30米/时/大气压)。在东德克萨斯一口生产井用高压冲蚀钻进法从705米钻至1828米只用24.2小时，与另一口井在相同井段用普通钻头钻进66.6小时相比说明高压冲蚀钻头较普通钻头的钻速快2至3倍。普通旋转钻钻头因其仅能施于井底18.4~22千瓦(25~30马力)(最多也不超过73.5千瓦或100马力)的功率而受到严重的限制，井底动力钻具也只有73.5~147千瓦(100~200马力)。冲蚀钻头则几乎不受这种限制，且其钻速还能够通过减小钻头尺寸而提高。试验时通过增加泵功率可以大大提高高压冲蚀钻井的速度，试验表明在68.83~100.55兆帕(703~1027公斤/厘米²)压力和1765千瓦水功率(2400水马力)时钻速可以成倍(由6.1米/时增大到12.2~18.3米/时，即2~3倍)增加。冲蚀钻头的钻速正比于水马力，所以在该试验井中将泵功率增大到4412千瓦(6000水马力)时，钻速可望比水功率为1765千瓦(2400水马力)时再增大2~2.5倍(即增大到30.5~48.8米/时)。也就是说在这样的功率水平下冲蚀钻头将比普通钻头的钻速加快五至八倍^[147]。

七十年代末美国瑞德公司曾在东德克萨斯中软地层进行了超高压的喷射钻井井下工业试验，试验井深达3000米。在现场共使用36辆高压水泥车并把它们分为两组，每组分工作20分钟就需要交替检修更换泵的易损件。试验了三组不同尺寸的小喷嘴：喷嘴直径为2.29毫米的一组喷嘴，工作泵压达138兆帕(1406大气压或20000磅/英寸²)；喷嘴直径为2.54毫米的一组喷嘴，工作泵压达103.5兆帕(1054大气压或15000磅/英寸²)；喷嘴直径为2.92毫米的一组喷嘴，工作泵压为69兆帕(703大气压或10000磅/英寸²)。共约试验了30只8 1/2"牙轮钻头，机械钻速平均比同类钻头提高30~50%。这一井下工业试验成本虽很高，但确证了超高压喷射钻井是能够大幅度提高钻速的。

上面扼要介绍了喷砂钻井法、高压冲蚀钻井法以及超高压喷射钻井井下工业试验，都表明在石油钻井工程上可以进一步利用高压水射流的水力能量来强化破岩提高钻速。水力破岩作用的大小与射流的喷射速度、喷嘴压降、井底水功率的大小等直接有关。这些方法之所以仍处于试验研究阶段，主要是由于所使用高压设备的耐久性和经济性以及工艺上的一些具体技术问题尚待解决。但是高压水射流在钻井工程上的应用与研究对于我们认识与提高现阶段生产上广泛应用的喷射钻井工艺技术可能是大有启发的。

在此,还要说明的是自从高压水射流技术逐步在采煤、机械加工、建筑和造船工业等领域日益广泛地得到应用以来,特别是国际水射流切割破碎讨论会七十年代成立以后,引起了钻井工作者对射流机理和应用的重视和兴趣^[8]。射流的冲蚀和净化作用随射流在井底或其附近产生的空穴程度的增加而加强。1978年9月,美国在休斯敦召开的射流技术会议上,正式提出在钻井中研究试用新型射流,即空化射流和冲击(高频脉冲)射流。近年,美国NL集团海卡洛格(Hycalog)公司新研究成功了一种结构型的声谐振荡射流(STRATOJET)^[8,125,126],它能使射流形成大的不连续的旋涡环,能比普通射流的成穴深度大几倍。根据这项研究所设计的新型喷嘴尤其适用于深井钻进的钻头。这种喷嘴产生的射流利用自谐振荡空穴作用,可把射流的临界空穴系数提高2~6倍,从而在深井条件下把钻头的机械钻速提高数倍。该文还指出,这种结构的射流甚至在未出现空穴的情况下也能改善井底的净化。为此目前国内外钻井界都在继续进行空化射流和冲击射流等新型射流的理论研究和试验工作。这方面的进展和成果也必将从另一方面为喷射钻井带来新的活力。

综上所述应该认识到:喷射钻井的发展虽已有了二十多年的历史,并已被国际钻井界公认为是一项在提高钻速降低成本上行之有效的钻井技术,虽然国内外已经进行了许多卓有成效的研究工作,但是喷射钻井的理论和技術仍在继续不断的深入,许多课题有待继续研究。顺便指出,那种认为喷射钻井已经“过时”,甚至有人认为喷射钻井已经没有什么继续进行研究的内容等等观点都是错误的、不符合事实的。喷射钻井的新理论、新工艺、新技术正向更高的水平发展。

第二章 喷射钻井的基本原理

喷射钻井时, 钻井液在循环的条件下从泥浆泵排出后经中心管柱(钻柱)到达钻头, 再从环形空间(钻柱与井眼之间)上返回到地面(泥浆池)。这个钻井循环系统简称为“泵-井眼-钻头”循环系统。为此首先要用钻井水力学的基本理论来说明该循环系统中水力能量的传递方法、合理分配及决定井底水力能量的因素。

一、水力能量的传递与分配

在钻井循环系统中, 地面泥浆泵是发生并传输出能量的心脏, 它推动钻井液循环。在循环时, 由于克服循环压耗和产生喷嘴压降而形成泵压, 即泵压是由下面四部分产生的:

- (1) 循环液在地面循环管汇(简称地面管汇, 指从泥浆出口起经地面高压管线、立管、水龙头、水龙头、到方钻杆为止)中的压力损耗(即地面压耗 P_s);
- (2) 循环液在钻柱(包括钻杆和钻铤)内的压力损耗(P_d);
- (3) 迫使循环液通过小直径的钻头喷嘴并使之加速形成射流(在喷嘴出口处具有相当大的喷射速度), 即产生喷嘴压降(P_b);
- (4) 循环液在钻柱和井眼之间环形空间的压力损耗(即环空压耗 P_a)。

写成数学表达式为

$$P_p = P_s + P_d + P_a + P_b \quad (2-1)$$

若把钻柱的钻杆段和钻铤段分开来则可写为

$$P_p = P_s + P_{dp} + P_{dc} + P_{ap} + P_{ac} + P_b \quad (2-2)$$

需要指出在(2-1)、(2-2)式中只有钻头压降是使通过喷嘴的高速射流对井底产生井底水力能量来清岩和破岩的; 而其他部分(指 P_s 、 P_d 和 P_a)都是压力损耗是造成和维持钻井液在循环系统中进行循环所不可避免的压力损耗, 我们把这部分称为循环压耗(P_c), 则:

$$P_p = P_c + P_b \quad (2-3)$$

泵的水力功率与循环压力(泵压)和循环速率(排量)有一定关系, 即根据:

$$N = PQ \quad (2-4)$$

式中单位: N 为千牛(KN); P 为兆帕(MPa); Q 为升/秒(L/S);

可得:

$$N_p = N_s + N_d + N_a + N_b \quad (A)$$

$$N_p = N_s + N_{dp} + N_{dc} + N_{ap} + N_{ac} + N_b \quad (B)$$

$$N_p = N_c + N_b \quad (C)$$

(2-5)

这就是说在喷射钻井中由泵传递给循环系统的水力能量(N_p)分配为两个部分: 一部分是为了建立和维持钻井液循环所不可避免地要消耗在循环管路(地面管汇、钻柱内部、环形空间)中的循环功率损耗(N_c); 另一部分是钻井液被强迫流过喷嘴时, 由钻头压降所形成高速射流作用在井底的有用井底(钻头)水功率(N_b)。在钻井时, 显然希望降低 N_c 提高 N_b 。用 N_b/N_p 表示泵功率能够传递到喷嘴上的大小程度, 其物理意义指泵功率的有用分配比值, 通称