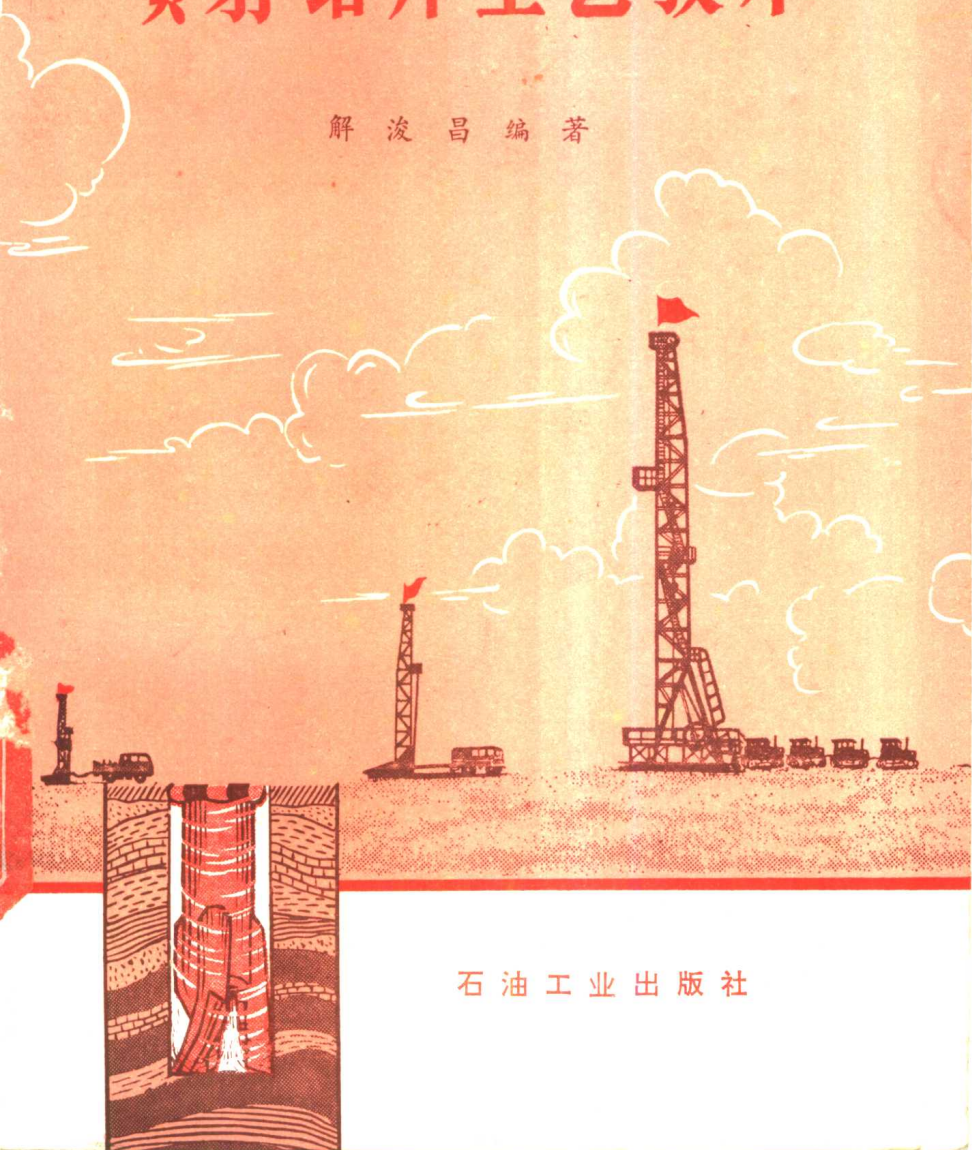


石油钻井工人进修丛书 1

喷射钻井工艺技术

解浚昌 编 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了喷射钻井的工作原理、喷射钻井的设计和计算方法，以及喷射钻井的经济效益分析。本文在总结现场经验的基础上，提出了一套较为适用的优选钻井水力参数的图表，简化了繁复的计算，并能达到较高的精度。

本书可供从事钻井工作的工人学习使用，也可供现场技术人员参考。

石油钻井工人进修丛书 1

喷射钻井工艺技术

康浚昌 编著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门内大街东后街甲36号)

北京计量印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 32开本 4¹/₂印张 6插页 97千字 印 1—2,000

1987年10月北京第1版 1987年10月北京第1次印刷

书号: 15037·2610 定价: 0.85元

ISBN 7-5021-0141-1/TE·139

前 言

根据 1983 年 12 月石油部在胜利油田召开东部勘探会议精神，钻井司副司长李克向同志组织安排编写钻井专业培训教材五册。其中“喷射钻井工艺技术”由胜利油田主编。这本教材在 1981 年编写的“喷射钻井工艺技术”一文的基础上作了补充删改。主要对象是现场从事钻井工作具有初高中及中专文化水平的人员，可以作为培训教材或参考用书。内容力求简明扼要，结合实际，易于掌握。

本书参考了国内外有关油田、院校发表的论文和教材，胜利油田钻井工艺研究院提供了 1973~1983 年喷射钻井有关的试验数据，书中图表是丛祥生、曹懋楨、王元录同志绘制的。

本书完稿后，经李克向同志审查，补充了第三章，修改了第六章，目录中标有*的章节建议作为选学内容。

由于编者业务水平有限，时间仓促，错误不妥之处请读者批评指正。

编写人 解浚昌

1984. 2

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 国外喷射钻井技术发展概况	(1)
第二节 国内喷射钻井试验推广的效果分析	(5)
第二章 喷射钻井工作原理	(17)
第一节 射流的结构和特性	(17)
第二节 射流的清岩作用和破岩作用	(22)
* 第三节 射流的水力参数	(32)
* 第四节 钻头水力参数	(35)
* 第五节 喷嘴结构及其水力特性	(39)
第三章 喷射钻井实践	(52)
第一节 喷射钻井的工艺配套	(53)
第二节 开钻前的质量检查	(54)
第三节 钻进中的注意事项	(55)
第四节 几项安全措施	(56)
第四章 喷射钻井的设计与计算	(57)
第一节 水力参数与泥浆流变参数相互适应的优选方法	(57)
第二节 应用 SP 水力计算尺进行喷射钻井的设计与计算	(71)
第三节 优选钻井水力参数的图解方法	(78)
* 第四节 泥浆流变参数的图表计算方法	(86)
* 第五节 应用可编程序计算器进行喷射钻井设计	(99)
第五章 固相控制与固相系统的设计与计算	(104)
第一节 不加重泥浆固相系统的设计依据	(104)
第二节 加重泥浆的固相控制	(115)

第六章 喷射钻井的经济分析及其发展	(122)
第一节 钻头比水马力与机械钻速的关系	(122)
第二节 喷射钻井的经济分析	(126)
第三节 喷射钻井发展趋向	(131)
附录 计量单位换算表	(133)

第一章 概 述

第一节 国外喷射钻井技术发展概况

美国从1938年研究喷射钻井,开始只注意提高排量,试验没有取得明显的效果。到1948年4月,用喷射式刮刀钻头,进行了26口井的现场试验。在得克萨斯海湾地区试验证明,钻速的提高与喷射速度成正比。诺莱在1948年发表了第一篇关于喷射钻井的文献,提出要在提高喷射速度上下功夫,试验取得了明显的效果,引起了人们极大的兴趣,开展了大量的研究工作。

为了产生高压高功率的射流,1947年研制出了750马力的泵,1949年又研制出850马力的泥浆泵,高功率的泵发展很快,泵的结构也从双缸双作用发展到三缸单作用,双缸双作用泵的功率从100马力发展到1999马力,如B-1640, Q_{max} 为1133加仑/分(71.5升/秒), P_{max} 为4570磅/英寸² (321公斤/厘米²) 形成系列。三缸单作用泵从370马力发展到1867马力, Q_{max} 为901加仑/分(56.8升/秒), P_{max} 为5555磅/英寸² (390公斤/厘米²), 也形成系列。据报道,易损件缸套活塞平均寿命达200小时,最高可达2891小时,凡尔体、凡尔座寿命超过2000小时,可以持续地高压运行,适应高压喷射钻井的要求。

喷射式钻头开始是喷射式刮刀钻头,50年代就搞了喷射式牙轮钻头,60年代出现了硬质合金镶齿钻头,滚动密封轴承发展到滑动密封轴承,钻头寿命平均达到120小时以

上。最高的 268 小时，比普通牙轮钻头提高 5 倍多。喷射钻井在美国 50 年代有 1/3 井队推广使用，钻井速度、台年进尺从 1949 年的 9850 米到 1964 年 18651 米，翻了一番。

随着喷射钻井的发展，对泥浆提出了更高的要求，泛美石油公司于 1966 年试验成功了低固相不分散体系的聚合物泥浆。随后发展了生物聚合物泥浆，这种泥浆具有抑制泥岩膨胀和不分散的作用，有利于泥岩井段的稳定，而且摩阻小，能量损失小，剪切稀释特性好，当高速射流喷出钻头时，粘度低，有利于破岩、清岩。提高钻速；上返时变稠，当控制流态处于层流时流型好，形成平板层流，携岩能力强，净化井壁好，不冲刷井壁，有利于井眼稳定。这种泥浆在 1968 年以后得到了广泛应用，使钻井速度又有大幅度的增长。到 60 年代末钻井速度又翻了一番，1970 年美国的台年进尺达到 27855 米。

固相控制，泥浆中钻屑的清除，国外 50 年代就开始研究，1954 年使用了 6" 除砂器，1962 年使用了 4" 除泥器，1966 年开始研制使用细筛布的振动筛。到目前为止象斯威科公司、白劳德公司、阿莫柯公司等都能生产高效率的机械固控系统，有效地清除泥浆中的钻屑，一般对轻泥浆系统，使用细筛布振动筛，筛布有 40 目、60 目、80 目和 100 目（140 μ ）的，更细的试验用的有 200 目（74 μ ）、325 目（44 μ ）的振动筛。旋流除砂器、除泥器从 12"~2" 形成系列（140~20 μ ）。高速离心机清除更细的固相（20~2 μ ），例如白劳德公司的分级处理的固控装置，组装在一个底座上，每天能清除 75 米³砂子，配合聚合物泥浆，可以保持低比重不上升。这种固控系统与聚合物泥浆形成了现代的先进的泥浆工艺技术，它是钻井的基础和技术关键，对安全优质快速钻井起主导作用。

50年代以后美国对在喷射钻井基础理论方面的研究比早期更为重视，这是在整个钻井技术发展的科学阶段（1948~1968）一个突出的特点，没有研究试验的正确理论指导，就带有一定的盲目性，就不可能促进生产上的飞跃。例如美国在40年代搞喷射钻井采用大排量的论点就是这样。一个错误的理论导致试验工作十年徘徊的结局。通过20年的研究试验，喷射钻井已经具备了一套比较完整的理论。这就是：

“钻井水力学”研究了射流的特性与喷嘴结构及水力参数、破岩、清岩的作用。Kendall 和 Goins 提出的喷射钻井最大水马力、最大冲击力和最高喷射速度的三种工作方式，通过验证前两种效果显著，解决了喷射钻井的能量最大限度的利用问题。1970年又研究井底流场提高清岩效果。1957年成立了钻压转数协会、泥浆协会。到60年代形成了环空流变学，研究泥浆的流变参数的优控优配方法，找出了泥浆的最优工作区。60年代中期对泥浆类型和固控理论有了很大发展。这样就形成了喷射钻井破岩、清岩、携岩、除岩及能量利用一整套理论。并基本上弄清了钻井各可变参数在不同地层中与钻速的关系，建立了一系列能定量计算的数学模式，为最优化钻井奠定了基础。

喷射钻井的实践也证明了理论的正确性，研究试验促进了理论的发展，例如美国几个地区喷射钻井的水平，参数配合和记录列入表1-1、表1-2、表1-3。不管软地层或硬地层，浅井或深井，都采用了喷射钻井技术，取得了明显效果，例如在路易斯安那地区，1963年创造了在软到中硬地层最快的一口3052米的井钻井时间只用了51小时，在深井硬地层中，同一地层的两口井，一口井使用普通三牙轮钻头，钻头水马力160马力，用了120天，钻达5185米。另外一口井使用喷射式钻头，钻头水马力400~700马力，仅用了50天

就钻完了 5156 米。

表1-1 美国几个地区的钻井平均水平

地 区	地 层	统 计 井 数 口	平 均 井 深 米	平 均 钻 井 天 数	井 深 米
得克萨斯海湾	软一中硬	250	2402	11.2	3000以下
得克萨斯海湾	软一中硬	132	3542	39	3000~4500
海湾地区东部	软一中硬	102	3743	34.9	3000~4500
中 陆 地 区	中硬—硬	17	3813	55	3000~4500
西得克萨斯	中硬—硬	22	3695	41.7	3000~4500
海 湾 地 区	软一中硬	99	4970	75	
西得克萨斯	中硬—硬	116	6065	199	

摘自美国“钻井”，1977.5.

表1-2 美国喷射钻井水力参数

钻头 井段 水力参数	$9\frac{5}{8}"$ 及 $12\frac{1}{2}"$	$8\frac{1}{2}"$	水 钻 头
	0~3000 米	3000~4000 米	4000~5000 米
总泵压公斤/厘米 ²	155~210	176~220 (270)	200 以上
钻头水眼, 毫米	$\phi 10.8 \sim \phi 9.5 \times 3$ 毫米	$\phi 8 \sim \phi 8.7$	
钻头水马力	820~900	400~300	300~200
喷射速度, 米/秒	106~137~183	108~139	
上返速度, 米/秒	1.1~0.6	0.6~0.7	0.6~0.7
排量, 升/秒	39~32	19.5~22.4	
泥浆比重	1~1.2	低固相不分散泥浆	
泵 功 率	一般为1000~1600马力泵两台	B-1600型 2000 马力泵两台	

表1-3 美国喷射钻井记录

地 层	井 深 米	钻 头	钻井时间	年代	地 区	资料来源
软—中硬	3048	6	3天8小时	1961	南路易斯安那	钻采实践, 1961年
软—中硬	3052		2天3小时	1963	南路易斯安那	国外石油科技情报
软—中硬	3050		4天16小时	1962	马拉开波湖	国外石油科技情报
软—中硬	3093	4	3天9小时30分	1969	南路易斯安那	美“钻井”1972.2
中硬—硬	2972	13	11.4天	1971	怀俄明州	世界石油1971.5
中硬—硬	4267		14天	1961	南路易斯安那	钻采实践, 1961
中硬—硬	5156		50天	1963	美 国	国内外钻井 动态, 1973
中硬—硬	5772	13	122天	1976	西得克萨斯	钻井 1976.7
中硬—硬	5791	48	76天	1961	南路易斯安那	石油工程 师, 1962.3
中硬—硬	6689 /	19	135天	1976	西得克萨斯	世界石油, 1976.12
硬	5640	42	71天	1963	东得克萨斯	世界石油, 1964.2
硬	4197	23	138天	1973	墨 西 哥	快速钻井实例
硬	6096		100天	1973	得克萨斯	1974年钻井论文集

第二节 国内喷射钻井试验推广的效果分析

一、喷射钻井技术试验情况

国内喷射钻井的研究工作开始于60年代, 1964年北京石油学院钻井教研室刘希圣副教授带研究生对淹没非自由射流特性和喷嘴结构曾进行了较系统的试验, 获得了一些喷嘴水力特性的有关数据。并在教材上引进介绍了钻井水力学的计算。1964年胜利油田会战初期, 刮刀钻头上用 $3 \times \phi 17$ 毫米的水眼, 牙轮钻头上改为独水眼钻头试验, 见到一定效果。当时油田开发急需解决打直井的问题, 提出“破除恐斜

病，勇敢打直井”的要求，一直到1966年，胜利油田的钻井速度上了一个大台阶，当时在钻井工艺上形成了以刮刀钻头，满眼钻具，优质泥浆强化措施为特点，以机械破岩为主的一套优质钻井工艺。1966年8月份3252队试验成功后，创造了2300米左右的中深井四开五完，月进尺9800米的记录，队年进尺50761米，打得又直又快，试验队3252、32120队，井斜合格率达到100%。在油田大面积推广后，1966年平均年进尺由1965年的4958米上升到18599米，平均井深2383米，当时已接近美国的水平（美国1960年台年进尺是20377米，平均井深只有1395米），以 $8\frac{1}{2}$ 英寸井眼为例，统计129口井平均井深2285米，平均钻井周期8天19小时，比1965年平均76天提高8倍，同在时1966~1967年初还试验成功了聚丙烯酰胺泥浆（GX-1），由于十年动乱，中断了试验，但当时对喷射钻井的概念不明确，也没有引起足够的重视，只是沿用了50年代重压大排量的陈旧观点，而且这种强化措施也缺乏科学根据，加上刮刀钻头负荷重，耐磨性差，对深部地层也不适应，研究试验工作也停顿下来了，出现了1969~1974年钻井速度急剧下降，1974年胜利油田的台年进尺又降到7810米，而平均井深只有2136米。只有在孤岛油田开发期间，1400来米的浅井创造了队年进尺151420米的纪录。

1973年胜利油田又组建了专业队伍，开始研究国外喷射钻井的发展情况，调查了油田十年来钻井速度徘徊下降的实际问题，结合东营地区的地层特点和以往钻井的实践经验，确定了以喷射钻井为主的科研方向。1974年研究消化了有关喷射钻井的理论和实践经验，做了一些基础准备工作，开展了一些单项试验，如喷射式刮刀钻头的试验和泥浆

泵改造。首先在 32358 队莱 34 井试验 $\phi 14$ 毫米 $\times 3$ 陶瓷喷嘴,一只喷射式刮刀只用了 7 小时 47 分,钻达井深 1470.51 米,平均机械钻速为 177.44 米/时。而莱 35 井在相同地区相应井段,采用 1966 年的强化措施,一只刮刀钻头钻达井深 1410.17 米用了 18 小时 48 分,平均机械钻速为 72.76 米/时,初次试验证明,喷射钻井比强化措施(重压 25 吨,大排量 40~50),钻速提高 2.44 倍,试验效果明显,显示出喷射钻井的潜力很大,坚定了试验信心,1975 年元月 32358 队在王 11 井油田组织了第一次喷射钻井综合试验,包括喷射式金刚石刮刀钻头,改造的泥浆泵, PAM 泥浆,高频振动筛和井口机具,用一只 $9\frac{3}{4}$ 英寸金刚石刮刀钻头 $\phi 14 \times 3$ 的水眼,双 150 毫米缸套,排量为 43~47 升/秒,泵压开到 130~150 公斤/厘米²,钻头获得 300~400 水马力,控制钻压 15~20 吨,钻进平稳而且机械钻速很快,仅用了 26 小时钻达井深 2065 米,机械钻速为 79.44 米/时。超过了历史最高纪录,喷射钻井初露锋芒,显示出巨大威力,随后乘胜再战,并组织了 3252、32358 队于 1975 年在 14 口井上进行喷射钻井综合试验,工艺上逐步改进,措施上不断完善,技术上解决了断、卡、斜、刺等问题,工艺上实现了八个配套(泵、钻头、管汇、钻具、泥浆、净化、机具和钻井参数测试),总结出一套相应的工艺措施,1976 年 3252 队一年开井 12 口,交井 13 口,台年进尺 29163 米(其中有十口井平均井深 2761 米),32358 队平均井深 3022 米,台年进尺 21051 米,在莱洲湾地区,2800 米左右的井,试验井比一般的井机械钻速提高一倍,行程钻速提高两倍,成本下降 1/3,泵压 130~150 公斤/厘米² 钻头水马力为 300~400 马力,基本上具备了推广的条件,1976 年石油部在胜利油田召开

了现场会，总结推广喷射钻井，1974~1978年先后试验了89口井，1978年以来，各油田开展喷射钻井都取得了明显效果，特别是华北油田生产上见效快，形成了生产能力。胜利油田推广后，1978年队进尺提高46.17%，1980年提高37%。同时在1977年原有设备上改造、挖潜，把泵压升到160~180大气压，在河31-6井试验，钻速又见到了明显效果。但工艺装备不配套，特别是泥浆泵不能持续高压运转，需要解决以下几个技术关键。

1. 研制持续产生高压高功率射流的泥浆泵及其易损件，改进和引进高效率钻头。

2. 适应喷射钻井的低固相不分散体系的优质泥浆工艺技术，包括净化系统、处理剂和调整流变性能。

3. 参数记录、参数优选和泥浆流变学、破岩机理等应用技术的消化、验证与应用。

为了尽快地解决这些技术关键，把喷射钻井工艺提高到新水平，石油部把高压喷射钻井工艺技术的研究项目上报国家科委，列为重大科研项目之一，由胜利油田负责承担，华东石油学院参加，限期1978~1980年，要求达到的水平为一个高压喷射钻井队在东营地区沙河街地层，队年进尺达到3万米，赶上目前国外的钻井水平。

项目确定后，我们根据项目的三个方面的技术关键，开展了八个课题的研究试验。并在三年内先后进行了200~220大气压高压喷射钻井综合试验8口井，第一口井是义76-1井，以13天19小时钻完3200米的井，先后在4口井上创造了7天9小时上3000米，8天21小时上3200米，10天18小时打完一口3322.45米的井，日进尺达2047.81米，刷新了油田多项历史纪录。高压喷射钻井有了进一步的突破，但在井眼稳定、泥浆工艺、参数优选等方面还存在问

题。与此同时，建立了八个钻井试验流程及装置，并开展了试验验证工作。

通过三年的研究试验总的情况是：八个课题高压高功率泵胜 3 NB-900 泵和喷射式金刚石刮刀钻头基本定型，并都进行了鉴定。水力参数和流变参数相互适应的优选方法，通过室内现场验证计算准确，作了图表、计算尺和计算机程序可以应用于生产。参数记录可以连续取得资料，泥浆净化初步实现了三级匹配连续运行，低固相泥浆处理剂做了初步试验，环空流变学开展了试验验证工作，水力破岩机理得到了初步证实。通过现场高压喷射综合试验，钻速上有较大突破，成本下降幅度大，高压喷射钻井比一般喷射钻井行程钻速提高近 1 倍，钻井直接成本降低约 1/3。其技术经济效果见表 1-4、图 1-1 和表 1-5 所列数据。

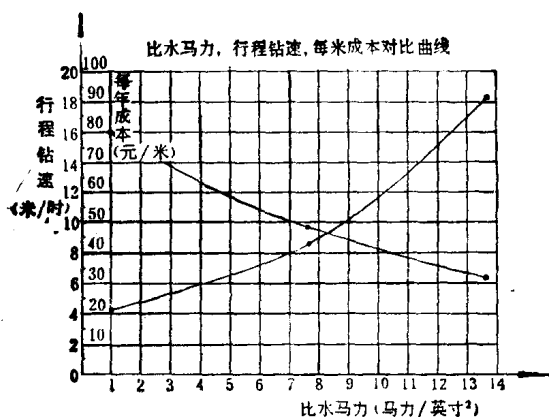


图 1-1 比水马力、行程钻速、
每米成本对比曲线

表1-4 喷射钻井经济效益

队号/井号	钻井方式	井深 米	使用钻头 数 只	纯钻进 时间 小时	起下钻 时间 小时	接单根 时间 小时	钻井总 时间 小时	行程 站速 米/秒	每米直接 钻井成本 元/米	备 注
32358/莱34	普通钻井	2729.52	1×3B+11×3A	188.48	103.30	22.92	299.70	9.17	39.95	1. 8 $\frac{1}{2}$ " A 国产 钻头500元/只
32165/莱28		2761.27	2×3B+10×3A	252.82	182.20	23.17	438.19	6.35	53.89	2. 聚晶金刚石 20元/粒
32549/莱55		2731.44	1×3B+22×3A	327.67	221.90	22.75	572.32	4.77	68.87	3. 起下钻循环泥 浆时间每1000米 3.7小时
32529/莱54		2736.89	1×3B+27×3A	308.13	236.13	22.75	567.01	4.83	69.05	
平 均 值		2749.78	20.25	264.28	182.13	22.90	469.31	6.28	54.56	
32333/莱1-231	130~150 大气压	2731.75	11×3A	266.98	84.98	22.75	374.71	7.29	40.52	4. 接单根时解每 10米一柄,每 单根5分钟
32320/莱1-121	全井牙轮	2754.09	15×3A	189.88	119.99	22.91	332.78	8.28	53.15	
32933/莱91	喷射钻井	2690.00	5×3A	186.88	35.70	22.42	247.00	10.87	40.42	5. 其它钻井费用 包括工资、燃料、 材料、折旧等
平 均 值		2725.28	10.3	215.25	80.22	22.09	318.16	8.82	44.43	

续表

队号/井号	钻 井 方 式	井 深 米	使用 钻 头 数 只	纯钻进 时 间 小 时	起下钻 时 间 小 时	接单根 时 间 小 时	钻井总 时 间 小 时	行 程 钻 速 米/秒	每米直接 钻井成本 元/米	备 注
3252/莱28-1	130~150	2629.84	2×3B金	107.23	18.87	21.92	148.02	17.77	29.46	6. 泥浆费用按第一组中泥浆费用平均数23612.40元除以钻井总时间
32358/莱38-15	大气压	2790.00	3×3B金	116.50	26.60	23.25	166.35	16.77	31.52	
3252/莱1-25	金刚石	2777.64	1×3B金3	151.65	10.27	23.08	185.00	15.01	29.28	
3252/莱1-22	刮刀喷	2742.52	3×3B金	126.48	28.12	22.83	177.43	15.46	32.44	
平 均 值	射钻井	2734.99	2.25	125.47	20.97	22.77	169.20	16.25	30.67	
3252/义76-1	201~220	2693.87	1×3B金	98.38	9.96	22.42	130.76	20.60	28.17	7. 其它钻井费用均用第二组中平均数2684.33元/时
3252/义37-1	大气压	2858.56	1×3B金	88.73	10.54	23.75	123.05	23.23	23.94	
3252/义61-1	金刚石	2762.22	1×3B金	86.10	10.22	23.00	119.32	23.15	24.42	8. 第二组中的费用按钻井所用实际钻井费用计算
平 均 值	刮刀喷射钻井	2771.55	1×3B金	91.07	10.25	23.06	124.38	22.33	24.79	
										9. 表中费用未统计钻前工程、固井、电测、套管等费用

表1-5 喷射钻井综合效果表

钻井方式		普通钻井 60~100大气压	喷射钻井 130~150大气压	高压喷射钻井 200~220大气压
比水马力 马力/英寸 ²		1 马力/英寸 ²	1.72 马力/英寸 ²	13.4 马力/英寸 ²
钻井时间 T		794 小时	381 小时	187 小时
钻井总进尺 H		3250 米	3290 米	3321 米
行程钻速 v_t		4.10 米/小时	8.64 米/小时	17.76 米/小时
与进尺有关	钻头费用	刮刀 2 只, 牙轮 24 只 8216 元 $C_b = 10.3$ 元/时	金刚石刮刀 1 只, 进口 牙轮 2 只 17400 元 $C_b = 46.7$ 元/时	金刚石刮刀 1 只, 进口牙轮 2 只 17400 元 $C_b = 93$ 元/时
	泥浆费用	41600 元 52.89 元/时	41600 元 109.19 元/时	41600 元 222.46 元/时
与钻井时间有关的费用 C_h		$C_h = 266$ 元/时	$C_h = 266$ 元/时	$C_h = 266$ 元/时
每小时费用 C_t		328.69 元/时	420.87 元/时	581.46 元/时
每米成本		80.17 元/米 (100%)	48.71 元/米 (60.75%)	32.74 元/米 (40.83%)

二、喷射钻井推广情况

从 1978 年推广喷射钻井、低固相泥浆和高效率喷射式钻头三大技术以来, 钻井速度有了很大提高。现在全国约有 540 个队实行喷射钻井, 使用的钻机类型有大庆 I 型, II 型, F-320, F-200, ZJ 45 型等。

推广喷射钻井后, 钻井速度有了显著提高(见表 1-6)。

在 540 台钻机中, 钻进时泵压在 100~120 大气压的占 60%, 140~150 大气压的约占 30%, 180~200 大气压的约占 10%。

现将这三种喷射钻井的钻机作个分析:

1. 用 140~150 大气压喷射钻井比用 100~120 大气压喷射钻井速度快, 成本低。在泥浆类型及性能和钻头类型