

改善井底流场能够提高钻速

廖 荣 庆

(西南石油学院)

摘 要

自从喷射钻井技术广泛应用以来,人们一直在研究如何充分利用喷射钻头在井底获得的水力功率,以获得更好的钻井经济效益。本文介绍了喷射钻头井底流场液流流向、井底排屑量和井底液流压力的试验研究方法及其应用。研究表明,由于井底流场的不完善而形成的涡漩、回流和滞流区是造成岩屑在井底重复破碎,影响井底净化效率的重要因素,改善喷射钻头的井底流场,最大限度地减少这些因素的影响,能够更好地发掘喷射钻井技术的潜力,提高钻井速度,降低钻井成本。

实 验 室 试 验

1. 井底流场液流流向的试验研究

钻头周围空间内液流的流动方向,直接反映了钻头冲洗系统的排屑特点,反映了岩屑在井底流场内的运移方向、路线和变化规律。因而,对于井底流场内液流流动方向的试验研究,不仅可以了解岩屑的运移情况,而且可以研究影响井底排屑的因素,探索提高井底净化效率的途径。

试验是在 ZJ77-P1 型综合井底流场试验架上进行的(图 1 是试验架结构)。采用贴线法^[1]、8 $\frac{1}{2}$ " 三牙轮钻头、清水循环和钻头定角度旋转。为了了解喷嘴数量、组合方式及直径比值的变化对液流流向的影响,试验中采用恒定的排量和十分接近的喷嘴当量直径(受现有喷嘴直径系列的限制)。所有的试验均与三个相同直径喷嘴的钻头相比较。试验绘制的液流流向图可以通过电视录像进行检查和核对。为了了解喷射速度的变化是否会影响井底流场的液流流向,在常规的低压试验的基础上,选择一些典型的喷嘴组合方案,缩小喷嘴的当量直径,进行了较高压力的试验,使钻头压降达到了 80~100 kg/cm²,这已接近我国当时矿区的实际条件。试验表明,喷射速度的变化对液流流向的基本规律没有明显的影响。

试验前,根据试验方案的要求,在钻头表面的各测点上,用特殊粘结剂粘贴上短丝线。试验时短丝线的自由端将指示出各测点处液流流动的方向及其变化。贴线的位置、密度及其长度,取决于钻头尺寸及试验的要求。

在试验中以及通过液流流向图的对比分析发现,由于在狭小的上返流道内同时有高速的向下的射流(正向喷嘴)和低速的上返液流存在,不仅要影响射流结构,消耗射流的水力能量^[1],而且在向下射流的正向喷嘴的两侧,产生了阻碍排屑的涡漩和导致岩屑返回井底的回流(逆流)。有关研究指出,当采用三个直径相同的喷嘴时,由于三股能量十分相近的射流

在井底的相互干扰，而在井底形成阻碍排屑的滞流区^[1]。看来仅仅从提高射流的水力能量和钻头的水力功率来提高井底净化效率是不完善的，还必须研究如何改善井底流场，以便最大

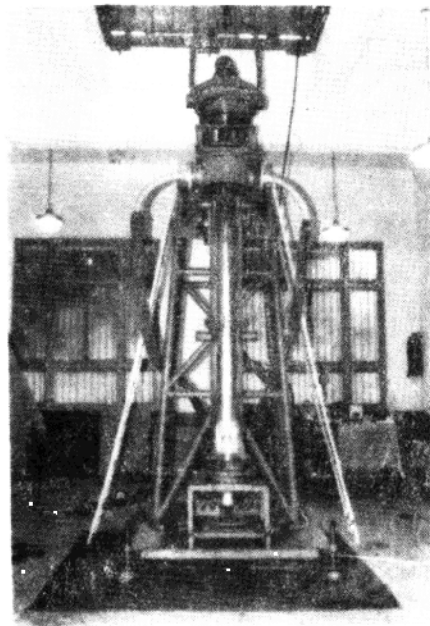


图 1 ZJ77-P1型试验架

限度地减少影响井底排屑的因素，更为充分地利用钻头在井底获得的水力功率，提高井底净化效率。

试验表明，井底流场内的涡漩、回流和滞流区是阻碍井底排屑，影响井底净化效率的重要因素。而通过喷嘴数量、组合方式和直径比值的调节，可以不同程度地减少以致消除这些因素的影响。通过试验可以为钻头确定合理的喷嘴数量、组合方式和直径比值，提高井底净化效率，充分利用钻头的水力功率，因而可以进一步提高钻井速度，降低钻井成本。图 2 至图 4 是三种 $8\frac{1}{2}$ " 钻头的井底流场液流流向图。

通过井底流场液流流向试验研究所得出的基本认识是否可靠呢？下面的井底排屑量试验将为我们提供进一步的依据。

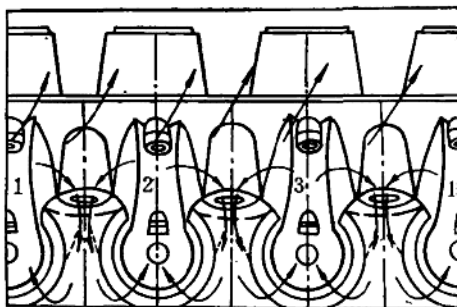


图 2 三个等直径喷嘴钻头井底场液流流向图

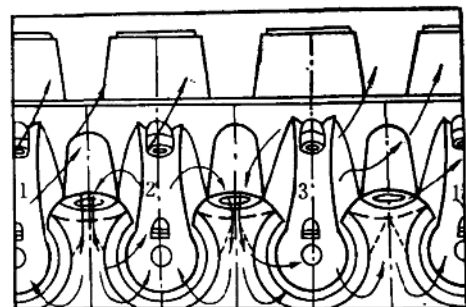


图 3 两喷嘴钻头井底场液流流向图

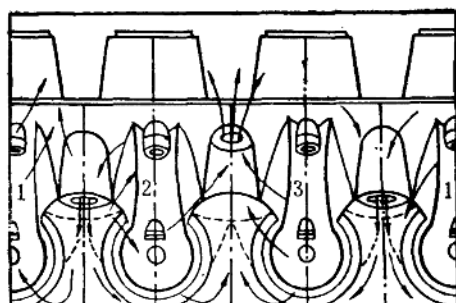


图 4 反喷嘴钻头井底场液流流向图

2. 井底排屑量试验

喷射钻头在井底工作时的排屑能力，是指液流（包括射流）将岩屑冲离井底并运移至钻头以上环形空间的能力。它可以用井底相对排屑量来表示。

井底排屑量试验仍然是在 ZJ77-P1 型井底流场试验架上进行的，试验时只需要换上图 5 所示的测试井筒，而不需要增加其它特殊装置。为了便于比较，采用与液流流向试验相同的条件参数和喷嘴组合方式，选用矿场的实际岩屑，图 6 是试验用岩屑的照片。

在实际的钻井过程中，钻头的类型、尺寸、喷嘴、喷距、排量以及地层的岩石密度等因素是确定的，因而当知道钻速后，与之对应的单位时间内井底产生的岩屑量是相对稳定的；而在相同的条件下，不同喷嘴数量、组合方式和直径比值的钻头的井底排屑率（即各自的井底排屑能力），由于井底流场的完善程度不同而不相同的。因此，在井底排屑量试验中，采用相同的钻头、喷距、排量、冲屑时间、排屑距离和相同的装屑量，只改变喷嘴的数量、组合方式和直径比值。表 1 是井底排屑量的部分试验数据^[2]。试验完全证实了上述分析是正确的，而且可以得出与液流流向试验一致的基本结论，即通过喷嘴数量、组合方式和直径比值的合理选择，可以改善井底流场，改善井底排屑条件，提高井底净化效率，因而可以提高钻速和降低钻井成本。

显然，井底相对排屑率是井底流场完善程度的一个综合性指标^[2,3]。改变喷嘴的数量、

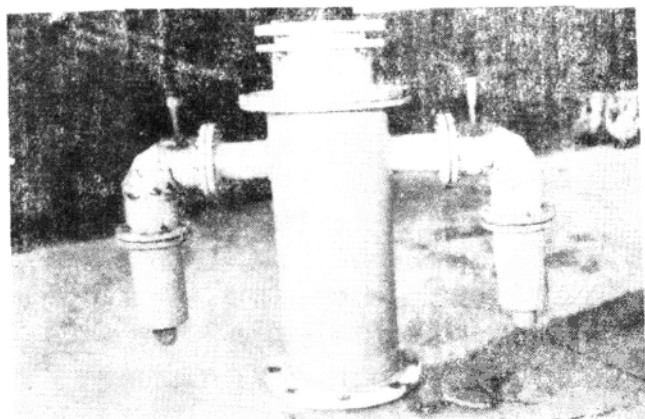


图 5 排屑量试验装置



图 6 试验用岩屑

表 1

喷 嘴 组 合	排 量 升/秒	时 间 秒	排 屑 量 克/秒	相对排屑率	δ_{max} %
3× $\Phi 10$	7.8~7.9	30	206.10	0.773	0.5
$\Phi 15+2\times\Phi 8$	7.8~7.9	30	255.47	0.958	3.00
$\Phi 12+2\times\Phi 9$	7.8~7.9	30	263.47	0.988	1.00
$\Phi 17$ (单侧)	7.8~7.9	30	259.03	0.971	3.68
$\Phi 14$ (单侧)	7.8~7.9	30	266.17	0.998	/
$\Phi 17$ (单、中、锥)	7.8~7.9	30	230.63	0.865	5.00
$\Phi 14$ (单、中、锥)	7.8~7.9	30	264.13	0.990	1.30
$\Phi 14$ (中、扩)+ $\Phi 10$	7.8~7.9	30	230.90	0.866	4.60
$\Phi 12$ (中、扩)+2× $\Phi 9$	7.8~7.9	30	237.57	0.891	2.90

组合方式和直径比值,都将直接影响钻头井底流场内液流的流动方向、排屑条件和相对排屑率。而实质上是对钻头在井底所获得的总的水力功率进行合理分配,并从中选取最优方案,充分利用钻头的水力功率,并改善井底排屑条件,提高井底净化效率。

实验室所测到的井底相对排屑率虽然可以作为我们选择喷嘴组配方案的参考,但是在实际钻井过程中,我们无法确定实际的井底排屑率,以及判断室内试验结果的准确性,也无法判断是否获得了最佳钻速。不过我们知道,正常的钻井过程中,井眼内的排屑是一个稳定的连续的过程。因此,如果能及时地确定泥浆在井眼环空中的携屑能力(运载比),那么根据钻头直径、钻速、岩石密度以及所确定的运载比和井底相对排屑率,可以计算出任一时间内的相应的井口正常排屑量(范围值),将它与同一时间内实测的井口排屑量进行比较,可以帮助我们分析判断井底和井眼中的净化效率和实际的运载比,调整钻井参数和水力参数,辅助泥浆性能的调整,以及预测井底沉砂和井壁坍塌等井下复杂情况。显然,这需要进行大量的现场试验和统计分析。但是全部的监测工作并不复杂,可以通过专用装置和微型计算机在现场连续进行,并绘制出指示曲线。为了计算正常条件下的井口排屑量,如前所述,需要知道所用钻头的井底相对排屑率。

3. 井底液流压力测量

钻井过程中,大量的岩屑是在井底形成的,而在井底的大部分岩屑是由井底漫流排除的。如果我们将岩屑定义为“经钻头破碎后脱离了井底基体岩石的极不规则的小的岩石碎块”,那么通常所指的漫流特性就不仅仅是指漫流速度和对岩屑推力的大小,还应该研究和扩大漫流在井底的有效作用范围。如果考虑到这样一种实际条件,即岩屑是遍布整个井底的,井底的漫流是由喷嘴的高速射流形成的,而且由于距射流中心的距离不同,井底各处的液流速度和压力是不相等的。那么井底漫流特性(速度、推力、有效作用范围)不仅与排量和喷射速度有关,而且与井底液流压力的大小和分布情况、井底径向(横向)压力梯度值以及喷距等因素有关。另外,如果考虑到牙轮钻头工作时,牙齿是要压入地层的这一基本特点,那么井底漫流特性还将受钻头类型及其结构的影响^[2]。鉴如上述分析,对于各种不同喷嘴组合方式的钻头,进行全井底的压力测量和分析将更接近井下的实际状态。

试验表明,喷嘴数量、组合方式和喷嘴直径比值的合理选择,可以获得理想的井底液流压力分布,提高井底液流的径向压力梯度值,提高井底排屑能力,改善井底排屑条件,从而可以提高井底净化效率和钻井速度。表 2 是井底液流压力测量的部分试验数据。图 7 至图 14

是部分井底液流压力分布图。由图15可以看出在相同的条件下,所有不等径喷嘴组合方式的井底液流径向压力梯度 P_{TM} 的值,均大于三个相等直径的喷嘴组合方式。进一步表明前面两种试验的基本结论是可靠的。

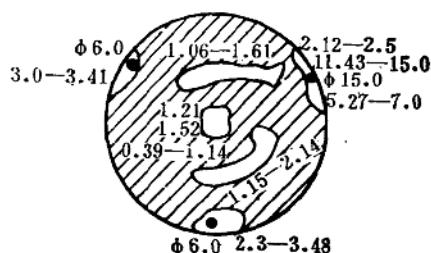


图 7 $\phi 15+2\times\phi 6$ 组合

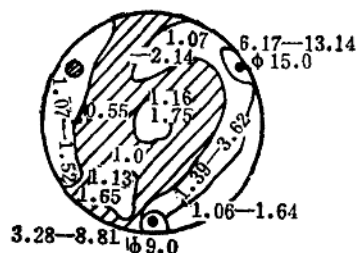


图 8 $\phi 15+\phi 9$ 组合

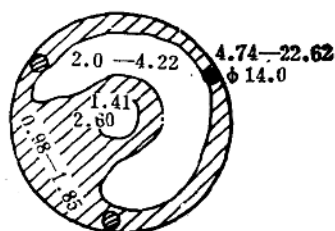


图 9 $\phi 14$ 单侧喷嘴

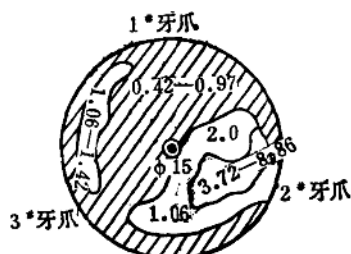


图 10 $\phi 15$ 锥形中心喷嘴



图 11 $\phi 17$ 扩散式中心喷嘴

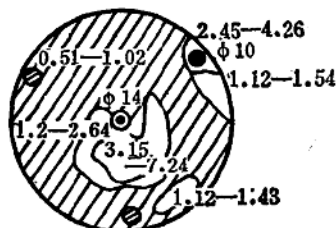


图 12 $\phi 14$ (中扩)+ $\phi 10$

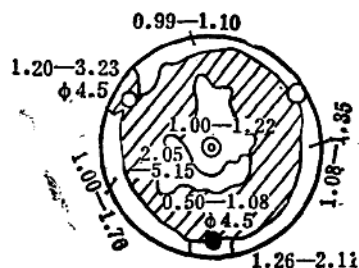


图 13 $\phi 16$ (中,扩)+ $2\times\phi 4.5$

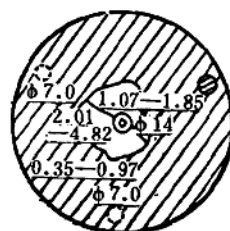


图 14 $\phi 14$ (中,扩)+ $2\times\phi 7$ (反)

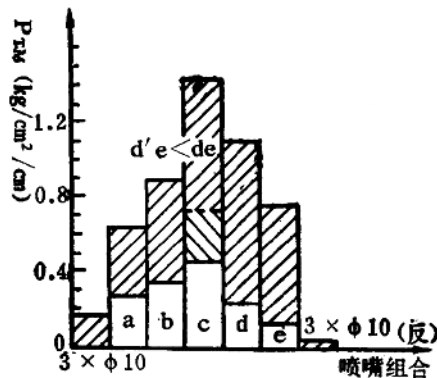
图例 ●正喷嘴 ○中心喷嘴 ○反喷嘴

●堵喷嘴 ●实测井底最高压力点

表 2

喷嘴组合与 P_{TM} 值

序号	喷嘴组合	P_{TM} 值 kg/cm ² /cm	备 注
1	3×Φ10	0.18	在射流中心点(喷嘴位置)间
2	Φ15+2×Φ3	0.62	在射流中心点(喷嘴位置)间
3	Φ12+2×Φ8.5	0.26	在射流中心点(喷嘴位置)间
4	Φ16.5+Φ5	0.88	在射流中心点(喷嘴位置)间
5	Φ15+Φ9	0.62	在射流中心点(喷嘴位置)间
6	2×Φ12	0.33	在射流中心点(喷嘴位置)间
7	Φ17	0.57	在射流中心点(喷嘴位置)间
8	Φ16	0.68	在射流中心点(喷嘴位置)间
9	Φ14	1.11	在射流中心点(喷嘴位置)间
10	Φ17(中, 锥)	0.45	2*牙轮下面最高压力点与喷嘴之间
11	Φ15(中, 锥)	1.41	2*牙轮下面最高压力点与喷嘴之间
12	Φ17(中, 扩)	0.72	2*牙轮下面最高压力点与喷嘴之间
13	Φ15(中, 扩)	0.64	2*牙轮下面最高压力点与喷嘴之间
14	Φ16(中, 扩)+Φ6.5	0.24	中心与堵喷嘴之间
15	Φ14(中, 扩)+Φ10	1.09	中心喷嘴下面无高压点
16	Φ14(中, 扩)+2×Φ7	0.37	井底高压点与堵喷嘴之间
17	Φ12(中, 扩)+2×Φ9	0.36	井底高压点与堵喷嘴之间
18	Φ16(中, 扩)+Φ6.5(反)	0.53	中心喷嘴与堵嘴之间
19	Φ14(中, 扩)+Φ10(反)	0.34	中心喷嘴与堵嘴之间
20	Φ12(中, 扩)+Φ12.5(反)	0.45	中心喷嘴与堵嘴之间
21	Φ16(中, 扩)+2×Φ4.5(反)	0.13	中心喷嘴与反喷嘴之间
22	Φ14(中, 扩)+2×Φ7(反)	0.52	中心喷嘴与反喷嘴之间
23	Φ12(中, 扩)+2×Φ9(反)	0.13	中心喷嘴与反喷嘴之间
24	Φ16(中, 扩)+3×Φ4(反)	0.73	最高压力点与反喷嘴之间
25	Φ14(中, 扩)+3×Φ6(反)	0.44	最高压力点与反喷嘴之间
26	Φ12(中, 扩)+3×Φ7(反)	0.06	最高压力点与反喷嘴之间
27	3×Φ10(反)	≈0	井底最大压差0.34kg/cm ²

图 15 喷嘴组合与 P_{TW} 值

- a—三个不等径组合; b—二个不等径组合;
c—单喷嘴; d—具有中心喷嘴的组合;
e—中心喷嘴与反喷嘴组合

由图10至图12可以看出,在某号牙轮的下面的井底测点出现了预料之外的较高压力区,

而且都是具有中心喷嘴的钻头。显然，这一现象与喷嘴布置、中心喷嘴的结构以及钻头结构有关。如果设计一种特殊结构的中心喷嘴，使得这种中心喷嘴的射流和井底漫流既能消除涡漩、回流和滞流区的影响，缩短至井底的喷射距离，充分利用钻头的水力功率，又具有最短的井底排屑距离，而且对牙轮端部的冲蚀能控制在不影响钻头使用寿命的最低限度。同时，采用这种特殊结构的中心喷嘴以后，显然原有的三个喷嘴可以去掉，因而可以扩大上返流道，改善井底排屑条件。

牙轮钻头有许多种不同尺寸和类型，有各自的使用条件，因而试图寻找一种对于任何尺寸和类型的钻头都适用的最佳喷嘴组合方式是不可能的。试验表明，各种喷嘴组合方式都有其相应的使用条件和合理直径比值范围。例如，由井底液流压力测量的结果表明，当采用三个不等直径的正向喷嘴组合时，合理直径比值范围是0.30~0.50之间，而两个不等径喷嘴组合时的合理直径比值范围是0.5~0.6之间等等。而单一的侧向喷嘴布置方式只适用于深井中的小尺寸钻头。因此，对于钻头的喷嘴数量、布置方式和直径比值的选择，必须根据所用钻头尺寸和类型来综合考虑，特别是要根据矿场使用情况予以修正。

井底液流压力测量的试验可以在液流流向测绘时同时进行，也可以单独在 ZJ77-P1 型综合井底流场试验架上进行。图16是井底液流压力测试原理图。表 3 是钻头每次的转角及其对应的井底测点密度。为了便于统一试验用的喷嘴系列，便于试验的系统比较，在井底液流压力测量中采用与前面两种试验相同的条件参数。另外，考虑到喷嘴的射流速度远远大于钻头的最大切向速度，试验是在不连续旋转的条件下进行的。而且部分旋转条件下的试验表明 ($n = 15、30、60$ 转/分)，钻头的旋转不影响井底液流压力的基本分布规律。

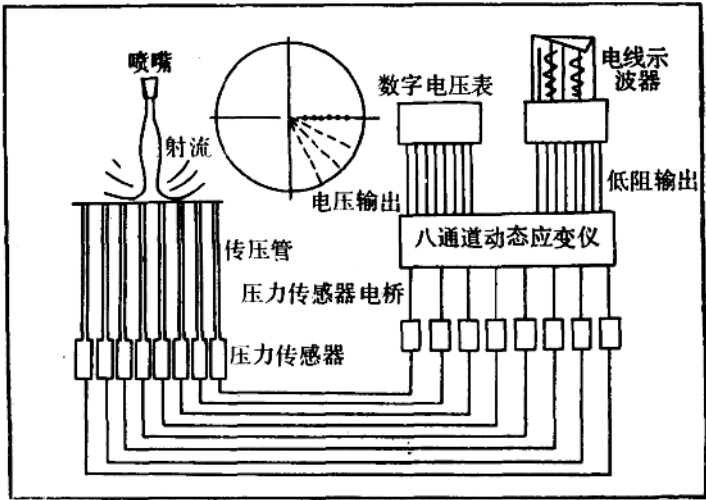


图 16 井底压力测试原理图

表 3 钻头转角与测点密度

每次转角, 度	15	10	5
每周测点数, 个	192	288	598
测点密度, 个/英寸	3.38	5.08	10.50

现场试验

在室内试验和矿场调查的基础上, 1982年5月至1983年4月, 与四川石油局川中矿区联合进行了五口井共17只钻头的井下试验。

1982年在该矿区的第13、14、15和88号井进行了第一批12只钻头的井下试验。试验井段是泥岩、页岩和砂岩, 地层比较平缓, 没有异常高压地层。为了检验室内试验的基本结论及其实用效果, 试验中选择与已完钻的邻井(对比井)相同或十分相近的钻头尺寸和类型, 采用相同或十分接近的钻井参数、水力参数和泥浆性能。只是通过喷嘴数量和直径比值的变化来改善井底流场。由于是8 1/2" 三牙轮钻头, 因而以单喷嘴钻头试验为主, 而用以对比的邻井中是采用三个等直径或不等直径喷嘴组合的三牙轮钻头。表4是试验统计分析表。据矿场统计分析表明^[4], 试验钻头的统计平均进尺是321.57米/只, 平均钻速是3.66米/小时。由16口邻井中条件相同或十分相近的128只钻头的统计分析表明, 邻井钻头的统计平均进尺是190.19米/只, 平均钻速是3.23米/小时(统计资料来源于川中矿区1982年钻井工程年报)。因此, 试验钻头与邻井比较, 平均钻速提高了13.30%, 同时在钻前费用相对增加的情况下, 每米钻井成本降低了10%。

表 4 川中矿区1982年8-1/2"钻头单喷嘴试验

井号	钻 头 (编号、喷嘴)	井 段 米	进 尺 米	纯钻时 小时	钻 速 米/小时	钻 井 参 数			
						钻 压 吨	转 数 转/分	排 量 升/秒	泵 压 kg/cm ²
金 15 井	No1. $\Phi 15 \times 1$	1746.61 ~1826.03	79.42	38.38	2.07	13	55	20	100
	No2. $\Phi 15 \times 1$	1848.84 ~1935.02	86.18	42.14	2.05	14	55	20	100
	No3. $\Phi 15 \times 1$	1949.44 ~1998.48	49.04	27.02	1.81	14	55	20	100
金 14 井	No4. $\Phi 17 \times 1$	1602.38 ~1847.55	245.17	84.01	2.92	13	55	23	100
	No5. $\Phi 16 \times 1$	1857.88 ~1961.66	103.78	53.23	1.95	13	55	22	100
金 13 井	No6① $\Phi 8.5 + \Phi 12.7$	737.51 ~1047.14	309.63	48.43	6.39	18	56	19	80/100
	No7②, $\Phi 14 \times 1$	1047.14 ~1699.31	652.17	146.67	4.46	18	58	20	110
	No8①, $\Phi 14 \times 1$	1699.31 ~2323.00	623.69	192.54	3.23	18	50	20	110
	No9②, $\Phi 14 \times 1$	2323.00 ~2373.06	50.06	54.13	0.92	18	54	18	115
角 88 井	No10, $\Phi 15 \times 1$	997.23 ~1769.02	778.93	153.36	5.08	17	58	23	120
	No11, $\Phi 5 \times 1$	762.64 ~840.91	78.27	12.54	6.24	15	75	23	120
	No12, $\Phi 15 \times 1$	840.91 ~997.23	156.32	26.58	5.88	14	76	22	100
	No13, $\Phi 15 \times 1$	1769.02 未完							

①金13井, 5号钻头, 两次下井使用。

②金13井, 6号钻头, 两次下井使用。

1983年4月,在该矿区的第23号井,进行了第二批五只单喷嘴钻头的连续试验,试验井段是401.52米至2128.86米。以泥岩、页岩和砂岩为主。众所周知,采用大功率的机泵并使钻头获得尽可能大的水力功率是实现喷射钻井的基本条件,因此在试验中,通过矿区人员的努力,同时将泵压较第一批试验井和邻井提高了30至45kg/cm²,而其它参数不变,取得了更好的钻井经济效益。表5是试验井与邻井(对比井)的25号井主要技术经济指标的比较表。这两口井是由同一个井队在相近的时间内施工的。可以看出,23号试验井的平均钻速较邻井提高了43.16%。每米钻井成本降低了31.79%。如果排除泵压升高这一因素的直接影响以后,再与条件相同的三个相等喷嘴直径的钻头相比较,这五只试验钻头的平均钻速可以提高16.14%。每米钻井成本降低了13.27%^[5]。

表5

井号	项目	井段 米	进尺 米	钻进时间 小时	平均钻速 米/小时	总钻头费用 元	平均每米成本 元/米
25	井	456.89~ 2093.10	1636.11	385.63	4.24	25,200	41.26
23	井	401.52~ 2128.86	1727.34	284.63	6.07	19,600	28.14

电测测井资料表明,由于采用单喷嘴和双喷嘴产生的水力侧向力,对井径和井斜没有明显的影响,这和我们室内试验的结论是一致的。试验时也没有造成井下复杂情况和井下事故。另外,由试验钻头后的观察分析表明,大多数试验钻头的清洗和冷却条件是良好的,使用和磨损是正常的。但是对于第二批提高泵压以后的五只试验钻头,在被堵塞了的喷嘴两用,牙爪出现了冲蚀现象,其中两只钻头的牙爪冲蚀比较严重,如图17示,影响了轴承的使侧寿命^[5]。在液流流向和排屑量试验中已预计到可能发生这样的情况,因为大量的岩屑是由堵喷嘴的一侧上返的。因此在井下试验前如果能够予以充分考虑,当泵压在140kg/cm²以上,预计钻速比较高时,事先将钻头的局部结构与喷嘴的装置角予以适当改变,这种现象是可以避免的。但是 we 和矿区都不具有这种能力。

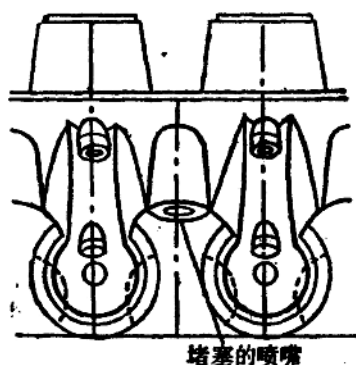


图17 牙爪冲蚀情况

结 论

1. 试验研究表明, 由于井底流场的不完善而形成的涡旋、回流(逆流)和滞流区是阻碍井底排屑, 导致岩屑在井底重复破碎, 影响井底净化效率的重要因素, 泵功率和钻头水力功率的提高并不能有效地克服这些因素的影响, 因而在提高地面机泵功率和完善工作方式、水力程序设计等内容研究的同时, 还必须研究和改善喷射钻头的井底流场, 以更为合理和更为充分的利用钻头在井底所能获得的满意的水力功率, 发掘喷射钻井技术的潜力, 进一步提高钻速和降低钻井成本。现场试验表明, 在相同的条件下, 通过喷嘴的调节来改善井底流场, 可以使平均钻速提高13.30%, 使每米钻井成本降低10%。

2. 试验研究表明, 通过喷嘴数量、组合方式和直径比值的调节, 可以减少以致消除涡旋、回流和滞流区的影响, 改善井底流场, 增大上返流道, 改善井底排屑条件, 提高井底净化效率, 延长钻头的使用寿命; 如果由于地面机泵功率的增大和泥浆性能的改善, 钻头在井底可以获得更大的水力功率时, 以及在深井条件下, 井底流场的改善将会获得更好的经济效益。

3. 喷射钻头的井底流场的完善程度受到现有钻头结构的影响。喷嘴数量、组合方式及直径比值的调节, 只是在现有条件下, 对钻头的水力功率进行合理的分配, 尽可能的改善井底流场, 提高井底净化效率。要获得完善的井底流场, 应该在钻头设计的同时, 注意钻头水力冲洗系统的研究与设计。目前至少应该对钻头的局部结构和喷嘴的装置方式及射流角度进行改进, 以适应改善井底流场的需要。

4. 对于现有结构的三牙轮钻头, 为了获得完善的井底流场, 进一步提高钻速和钻头寿命, 应该进行中心喷嘴的研究与设计。

致 谢

张绍槐教授对研究工作给予了全面指导。杜春常、向小壮、熊继有等参加了大量的试验研究工作, 谨此致谢。

参 考 文 献

- 〔1〕 张绍槐, “喷射钻井井底流场研究”, 西南石油学院学报, 第二期, 1—11, 1981
- 〔2〕 钻井研究室, “喷射钻井井底流场的试验研究(二)”, 西南石油学院学报, 第一期, 37—44, 1982
- 〔3〕 徐华义, “喷嘴数量、尺寸、比值对井底净化效率的影响”, 西南石油学院硕士研究生论文, 1982
- 〔4〕 〈1982年喷射钻井现场试验总结报告〉, 四川石油局川中矿区, 西南石油学院开发系, 1983, 2
- 〔5〕 钻井研究室, 〈川中矿区金23井单喷嘴钻头试验报告〉, 西南石油学院, 1983, 6