

刘希圣 主编

高等学校
教学用书

钻井工艺原理

中 册

钻进技术

石油工业出版社

(京)

TE24
002

060686



高等学校教学用书

钻井工艺原理

中 册

钻进技术

刘希圣 主编

(SY47/32)



200773573

SY47/28



石油工业出版社

京)新登字082号

内 容 提 要

本教材主要讲述石油钻井过程的基本工艺原理及各主要钻井法的工艺技术。全书共十章，分上、中、下三册出版。上册：破岩原理，包括钻井岩石力学基础、钻头及钻柱三章。中册：钻进技术，包括喷射钻井、钻进参数优选、防斜及定向钻井等四章。下册：完井工程，包括压力控制、固井及完井三章。

本书叙述简练，基本理论突出，并尽可能多地引入国内外钻井工艺新技术，是石油高校钻井专业学生的教学用书，并可供从事石油钻探工作的科技人员参考。

高等学校教学用书
钻 井 工 艺 原 理
中 册
钻进技术
刘希圣 主编

石油工业部教材编译室编辑(北京 902 信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京吴海印刷厂排版

北京市通县曙光印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 11 $\frac{1}{2}$ 印张 278千字 印5,001—8,000

1988年8月北京第1版 1992年7月北京第2次印刷

ISBN 7-5021-0113-6/TE·112

定价: 3.00 元

编者的话

《钻井工艺原理》教材，是培养石油钻井工程专业学生的主要专业课。初版是在1980年根据石油高等院校石油钻井专业教学计划的要求，由各高等石油院校部分教师集体编写而成的。在内容上基本包括了钻井工艺技术的主要理论，较多地引用了国内外当时的新理论、新技术，具有一定的先进性。自出版至今，已使用了五个年级，在石油高校钻井专业教学中发挥了重要作用，并对石油厂矿，科研单位和各种石油学校起了一定参考作用。

但是，由于该教材编写时各院校尚未制订教学大纲，因此在内容取舍上尚有不当之处，例如内容偏多，部分内容偏深；再者，近几年来，钻井工艺技术又有了新的发展，部分内容需要更新。基于以上原因，该教材有必要进行重新编写。

修改后的教材，是在原教材的基础上遵循以下原则编写的：

1. 本教材主要讲述石油钻井过程的基本工艺原理及各主要钻井法的工艺技术。对原教材的章节结构除海洋钻井一章另设选修课外，其它章节基本未做大的变动。考虑各院校教学计划安排的要求，新版教材全书共包括十章，分三个分册出版。即上册——破岩原理，包括钻井岩石力学基础，钻头及钻柱三章；中册——钻进技术，包括喷射钻井，钻进参数优选，防斜及定向钻井等四章；下册——完井工程，包括压力控制、固井及完井三章。

2. 少而精原则。下决心把篇幅压缩下来。从初版的95万余字（版面字数）压缩到60万字左右，以便在100学时左右讲完。

3. 突出基本理论。本教材是大学本科的必修课教材，因此对尚未成熟的和过于深奥的理论，只作简要的介绍，对于较深较新的内容可另开选修课，以扩大和加深学生的专业理论和知识。

4. 削枝强干。尽可能不写或少写工艺操作和设备工具结构等内容，必要时也应以讲解原理为主。为了配合本课的学习，各院校应辅以直观教学和生产实习，为学习专业理论课打好基础。

本书除了作为高等石油院校石油钻井工程专业学生的主要教材外，还可供从事石油钻探工作的科技人员参考。

参加编写本书的有华东石油学院教授刘希圣（第六章）、教授胡湘炯（第五章）、教授黄荣樽（第一章）、教授陈庭根（第二章）、副教授韩志勇（第四章）、西南石油学院教授郝俊芳（第十章）、副教授高光昭（第九章）、江汉石油学院教授李自俊（第八章）、大庆石油学院教授张建群（第三章）、副教授周大千（第七章），由刘希圣教授主编。

本书完稿后，由江汉石油学院教授郑基英，大庆石油学院教授黄匡道两同志进行了审查，西南石油学院教授张绍槐同志也提供了许多宝贵意见，特此一并致谢。

由于编者思想水平及业务水平有限，错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

第四章 喷射钻井	(1)
第一节 喷射式钻头的工作原理	(2)
第二节 水功率的传递原理	(18)
第三节 喷射钻井的水力程序设计	(30)
参考文献	(42)
第五章 钻进参数优选	(43)
第一节 影响钻进速度的主要因素	(43)
第二节 钻进参数的优选方法	(57)
第三节 多元钻进模式	(78)
参考文献	(89)
第六章 井斜及其控制	(90)
第一节 井斜的原因	(93)
第二节 钟摆钻具控制井斜技术	(102)
第三节 刚性满眼法控制井斜的技术	(109)
附 录	(115)
参考文献	(116)
第七章 定向钻井	(118)
第一节 定向井的基本概念	(120)
第二节 定向井井身剖面设计	(127)
第三节 实际井眼轴线的计算和绘制	(145)
第四节 定向井井斜角的控制	(154)
第五节 定向井的方位控制	(161)
第六节 定向仪器和定向工艺	(172)
参考文献	(177)

第四章 喷射钻井

在钻进中，及时地把岩屑携带出来是安全快速钻进的重要条件之一。

把岩屑携带出来要经过两个过程，第一个过程是使岩屑离开井底，进入环形空间；第二个过程是依靠泥浆上返将岩屑带出地面。过去，人们认为第一个过程比较容易实现，第二个过程则比较困难。所以，人们的注意力集中在第二个过程上，采取了“大排量洗井”的技术措施，以便加快岩屑的上返速度。这样做的结果，也确实有一定的提高。但是在钻井实践中常有这样的事，即钻头喷嘴被泥浆刺坏（泥浆排量并未减少）而使钻速显著下降。这一现象使人们重新认识这两个过程。经过多年的研究和理论分析，人们认识到第二个过程并不很困难，而困难的恰恰是第一个过程。也就是说，把岩屑冲离井底不是容易的事。岩屑不能及时离开井底，这正是影响钻进速度的主要因素之一。于是，人们将注意力转向了第一个过程，采取了一系列措施，去解决把岩屑冲离井底的问题。这就是喷射钻井的出发点。

把岩屑冲离井底为什么很困难呢？其原因主要有两个方面。

第一，在钻井中，井内泥浆柱压力大于地层内流体压力。如图 4-1 所示，井内液柱压力 p_h 大于地层压力 p_p 。则被破碎而尚未离开井底的岩屑受到 p_h 与 p_p 的压力差的作用，被紧紧地压在井底。要使它离开井底则要花很大力气，克服这个压力差的作用。

第二，泥浆在井底也有失水作用，在井底也会留下类似泥饼一样的东西，并与岩屑掺混在一起，盖在井底，形成一个“垫层”，将钻头与井底隔开。这样，钻头要破碎新的井底，必须先清除这个“垫层”。这不仅浪费了功率，而且出现了岩屑的重复破碎，降低了钻速。

岩屑不能及时离开井底，还有一个严重的后果，就是与泥饼掺混在一起的岩屑可能粘附在钻头的切削刃上，挤塞在牙轮钻头的牙齿之间，形成泥糊钻头或泥包钻头。这在非喷射钻井中是屡见不鲜的。

要解决岩屑及时冲离井底这个问题，就需要新的工艺技术，这就是喷射钻井技术。喷射钻井的一个显著特点，是从钻头喷嘴中喷出强大的泥浆射流，它具有很高的喷射速度，具有很大的水力功率，它能给予井底岩屑一个很大的冲击力，从而使岩屑及时地、迅速地离开井底，始终保持井底干净。这就是喷射钻井能够大幅度提高钻速的主要原因。

泥浆射流的作用，不仅能使岩屑冲离井底，而且在一定条件下可直接破碎岩石。这已为喷射钻井的实践所证明。

近年来，我国各油田都在大力推广喷射钻井技术，取得十分明显的成效。根据胜利油田的资料，在同一地区、大致相同的井深，喷射钻井比普通钻井的行程钻速大大提高，每米钻

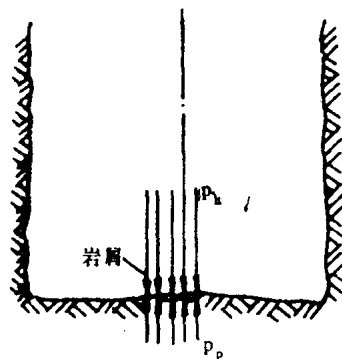


图 4-1 井底岩屑的受压情况

进成本（不包括钻前工程、固井、电测等费用）显著下降，而且随着泵压的增高，效果更为明显，见表 4-1。

喷射钻井理论是建立在淹没非自由射流对井底岩屑和岩石的作用之上的。喷射钻井的发展，大大促进了射流理论、钻井水力学、环空水力学以及泥浆流变学等学科的发展。为了适应喷射钻井的需要，也伴随着出现了钻井设备、工具和技术措施方面的改进。

表 4-1 喷射钻井与普通钻井的对比

钻井方式	普通钻井 (<100巴)	全井牙轮钻头 喷射钻井 (130~150巴)	全井刮刀钻头喷射钻井 (130~150巴)	全井刮刀钻头喷射钻井 (200~220巴)
统计井数，口	4	3	4	3
平均井深，米	2762.28	2725.28	2735.00	2771.55
平均使用钻头数，只	20.25	10.3	2.25	1
行程钻速，米/时	6.28	8.81	16.25	22.33
每米钻进成本，元/米	57.94	44.70	30.67	24.84

第一节 喷射式钻头的工作原理

喷射式钻头与普通钻头的区别，主要在于它的喷嘴特别讲究。泥浆通过它的喷嘴以后，能形成喷射钻井所需要的泥浆射流。这一节，我们先研究射流的结构，射流对井底的作用以及射流的水力参数，然后研究射流是怎样产生的，它与钻头喷嘴的关系以及钻头的水力参数。

一、射流的结构和特性

谈到射流，我们对它并不生疏。钻井工人用的泥浆枪，消防队用的消防水龙头以及小孩玩的水枪，它们喷出的液流都是一种射流。这些射流，从出口以后很长一段是处在空气中。由于空气密度很小，对射流的结构形状影响很小。这些射流都称为非淹没自由射流，它的形状如图 4-2 所示，呈圆锥状。但是，从钻头喷嘴中喷出的射流则与上述射流有所不同。它是属于淹没非自由射流。

（一）淹没非自由射流的形状

淹没，是指射流出口以后，就处在井筒内的泥浆中，被井筒内泥浆所淹没。由于泥浆的密度比空气大得多，所以射流在出口以后就受到淹没液体的巨大阻力。

非自由，是指射流的运动和发展受到固体环境的限制，不能自由地运动和发展。具体地说，射流到达井底以后，要受到井底和井壁的限制，还要受到钻头的限制，射流到达井底以后，一部分向四周散开，沿着井底横向流动，形成漫流；一部分向着与原来方向相反的方向返回。最后所有的射流液体都要经过环形空间返出地面。

北京石油学院钻井教研室于六十年代初期曾对淹没非自由射流进行过实验和研究。据实验测定，淹没非自由射流的形状如图 4-3 所示。射流刚出口的一段，其边界母线近似直线。

并张开一定的角度 α 。 α 角称为射流扩散角。由于返回泥浆的影响，使射流边界逐渐向中心收拢，使整个射流的形状变成“枣核”状或“梭”形。

射流的扩散角 α ，表示了射流的密集程度。显然， α 越小则射流密集性越高，能量就越集中，射程就越远。对于喷射钻井来说，我们希望扩散角越小越好。

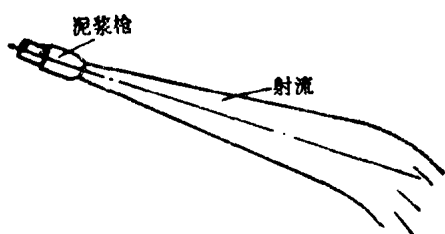


图 4-2 泥浆枪射流

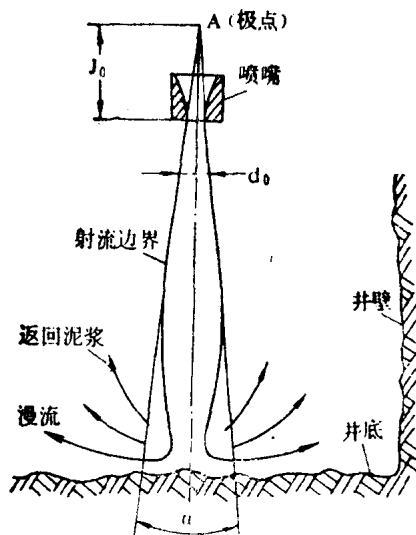


图 4-3 淹没非自由射流

(二) 射流的扩散系数 a

如图 4-3 所示，延长射流收拢以前的边界母线，交于 A 点，A 点称为射流的“极点”。极点至喷嘴出口的长度，以 J_0 表示，则

$$J_0 = d_0 / 2 \tan \frac{\alpha}{2}$$

令 $2 \tan \frac{\alpha}{2} = a$ ， a 即为射流的扩散系数。于是

$$J_0 = d_0 / a$$

在射流边界收拢之前，在喷射距离（即距喷嘴出口的距离）为 l 的截面上，射流的直径可以下式表示

$$d = d_0 + 2l \tan \frac{\alpha}{2} = d_0 + al$$

(三) 射流的速度分布

射流刚出口时，具有喷射速度 V_0 。实验证明，在射流刚出口的断面上，各点的速度分布基本上是相等的。假如射流出口后不受任何阻力，则液流质点将保持出口时流速的大小和方向。事实上，淹没非自由射流在出口后受到井筒内淹没

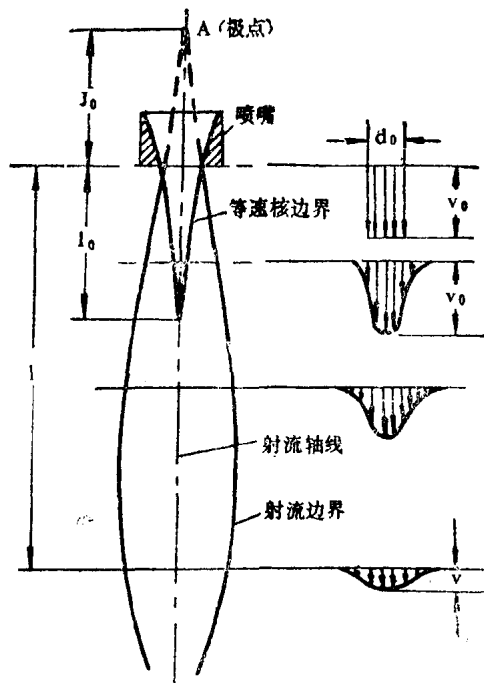


图 4-4 射流的速度分布

泥浆和返回泥浆的巨大阻力，使射流的速度分布发生了很大的变化。如图 4-4 所示，图中的箭头线既表示了速度的大小，也表示了速度的方向。射流各处的速度分布有如下规律：

1. 在射流的中心，由于受到淹没泥浆和返回泥浆的影响较小，所以速度最高。在射流的任一截面上，轴线上速度最高，自中心向外速度很快降低，到射流边界上速度为零。

2. 射流出口后有一段长度，这段长度内的中心部分始终保持刚出口时速度 V_0 。这段射流的中心部分称为射流的等速核。等速核的长度以 l_0 表示。这一段射流称为射流的初始段。超过初始段以后称为射流的基本段。

3. 从射流的轴线上看，初始段的轴线上，速度始终等于刚出口时的速度 V_0 。超过初始段以后，基本段轴线上的速度迅速降低。基本段轴线上任一点的速度，与该点距极点的距离成反比。其关系式如下

$$V/V_0 = (J_0 + l_0)/(J_0 + l)$$

由于 $J_0 = d_0/a$ ，所以

$$V = V_0 \frac{d_0/a + l_0}{d_0/a + l} = V_0 \frac{d_0 + al_0}{d_0 + al}$$

令 $(d_0 + al_0)/(d_0 + al) = b$ ， b 即为射流轴线上速度降低系数。于是得

$$V = bV_0$$

等速核是射流能量集中的部分。对喷射钻井来说，我们希望等速核越长越好。由于钻头结构方面的原因，喷嘴距井底的距离即喷射距离，总是有一定的长度。当喷射距离一定的时候，等速核越长，则能量最集中的部分越接近井底，对井底的清洗效果也就越好。

(四) 射流的动压力分布

射流液体具有一定的密度，射流又具有一定的速度。在射流前进的方向上遇到障碍物时，射流将给障碍物一个压力，这个压力就是射流具有的动压力。根据水力学原理，射流任一点的动压力与该点的速度有关，与射流液体的重度有关，其关系式如下

$$P_k = \frac{\gamma V^2}{200g} \quad (4-1)$$

式中 P_k ——射流某一点的动压力，巴；

V ——射流在该点的速度，米/秒；

γ ——射流液体的重度，千牛/米³；

g ——重力加速度，9.81 米/秒²。

由 (4-1) 式可以看出，射流速度越高则动压力越大。射流动压力的分布规律与速度分布规律类似。

1. 在射流的任一截面上，中心动压力最大，自中心向外，动压力急剧衰减，在射流边界上动压力为零。

2. 射流等速核内各处的动压力相等，都等于射流刚出口时的动压力，即

$$P_0 = \frac{\gamma V_0^2}{200g}$$

3. 在射流中心线上, 超过等速核以后, 动压力急剧下降, 如图 4-5 所示。

在图 4-5 中, $P_k/P_0 = v^2/V_0^2 = (bV_0)^2/V_0^2 = b^2$ 令 $b^2 = \lambda$, λ 即为射流中心线上的动压力降低系数, 而且

$$\lambda = \left(\frac{d_0 + al_0}{d_0 + al} \right)^2 \quad (4-2)$$

令 $l_0/d_0 = m_0$, $l/d_0 = m$, 则

$$\lambda = [(1 + am_0)/(1 + am)]^2 \quad (4-3)$$

必须指出, 射流的扩散角 α 和等速核长度 l_0 是与喷嘴结构有很大关系的。喷嘴不同, l_0 和 α 也可能不同, 这点将在后面详述。

二、射流对井底的清洗作用

明了了射流的结构, 我们再来谈射流怎样清洗井底。所谓清洗井底, 主要指把岩屑冲离井底, 保持井底“干净”。射流冲到井底以后能产生两种净化井底的作用, 其一是射流对岩屑的冲击压力作用, 其二是漫流对岩屑的横推作用。

(一) 射流的冲击压力作用

由于射流上每一点都具有一定的动压力, 当射流碰到井底以后, 将此动压力传给井底, 形成对井底的冲击压力 (此冲击压力即等于射流到达井底时的动压力)。岩屑在这个冲击压力的作用下, 会不会被压得更紧地贴在井底, 更不易离开井底呢? 不会的。其理由如下:

1. 射流的这个压力不是静压力, 而是冲击压力。此冲击压力不是作用在整个井底, 而是作用在如图 4-6 所示的小圆面积上。就整个井底而言, 射流作用的面积内压力较高, 而

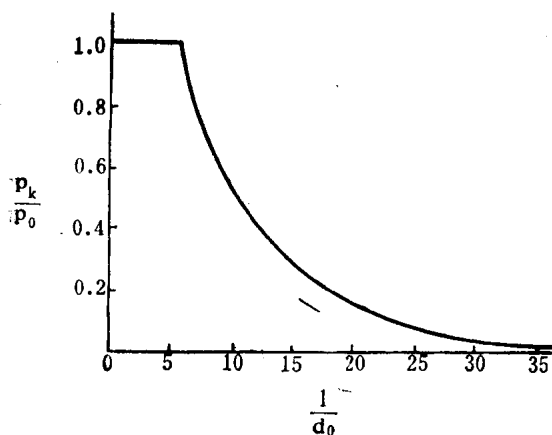


图 4-5 射流中心线上动压力分布规律

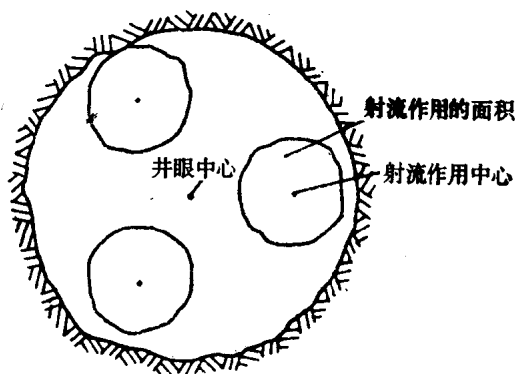


图 4-6 射流冲击面积

射流作用的面积以外压力较低。就射流作用的面积而言, 冲击压力也是极不均匀的, 射流作用的中心压力最高, 离开中心则压力急剧下降。

2 由于钻头的旋转, 射流作用的小圆面积在迅速移动。本来不均匀的压力分布, 又在迅速发生变化。

由于以上两个原因, 就使作用在井底岩屑上的冲击压力极不均匀, 如图 4-7 所示。极不均匀的冲击压力使岩屑产生一个翻转力矩, 从而离开井底。这种情况就好象地面上一个石

子，我们用棒子猛敲它的边缘，它会翻转着蹦起来一样。

显然，对清洗井底有实际意义的是冲击压力的不均匀性。衡量这种不均匀性的大小是用压力梯度。如图 4-8 所示为一个喷嘴发出的射流到达井底时对井底的冲击压力的分布情况。显然，在射流中心处，冲击压力最大，以 p_m 表示

$$p_m = p_0 \lambda = \frac{\gamma V_0^2 (d_0 + a l_0)^2}{200 g (d_0 + a l)^2} \quad (4-4)$$



图 4-7 岩屑翻转

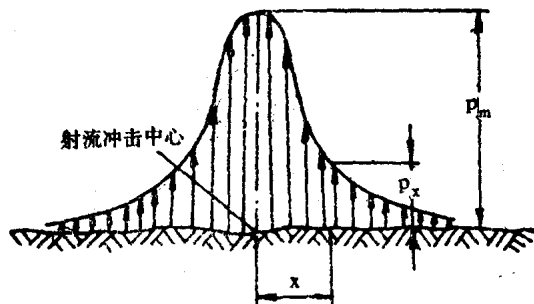


图 4-8 冲击压力梯度的分布

距离射流中心为 x 处的冲击压力为 p_x 。要求得 p_x 的大小，必须先知道冲击压力的分布规律。目前，对于淹没非自由射流来说，由于从井底返回的泥浆对射流的影响较为复杂，所以其分布规律尚不能用数学式表达。对于淹没自由射流（即射流到达井底以前不受返回泥浆的影响来说，它的冲击压力分布可用下述关系式^[1]表示

$$p_x = p_m \cdot e^{-\frac{2.1x^2}{d_0^2}} \quad (4-5)$$

式中 e ——自然对数的底；

d_0 ——喷嘴出口直径。

对 (4-5) 式取 x 的一阶导数，可求得冲击压力梯度的分布为

$$dp/dx = -\frac{4.2x}{d_0^2} p_m e^{-\frac{2.1x^2}{d_0^2}} \quad (4-6)$$

对 (4-6) 式再进行一次微分，并令 $d^2p/dx^2=0$ ，即可求出最大压力梯度所在的位置。得出最大压力梯度发生在 $x = \frac{d_0}{2\sqrt{\lambda}}$ 处，将此 x 值代入 (4-6) 式中，即求得最大冲击压力梯度的值

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_m = -\frac{2\sqrt{\lambda}}{d_0} p_m e^{-\frac{1}{2}} \quad (4-7)$$

由以上分析可知，要提高射流对井底的净化能力，就要增大射流对井底的冲击压力梯度。从 (4-6) 和 (4-7) 式可以看出，冲击压力梯度与射流到达井底时射流中心的冲击压力 p_m 成正比。为了提高冲击压力梯度，就要增大 p_m 。由 (4-4) 式可以看出，要增大 p_m

就需要提高射流的出口动压力 P_0 ，并增大射流的压力减低系数 λ 。

由 (4—7) 式还可以看出，缩小喷嘴直径 d_0 ，也是增大冲击压力梯度的途径之一。

以上分析和有关公式是从淹没自由射流的规律得出的，所以只能定性地说明问题。对于淹没非自由射流，不能用 (4—6) 和 (4—7) 式作定量的计算。

(二) 漫流的横推作用

射流冲向井底以后，就形成沿着井底横向流动的漫流。某些实验证明，漫流是很薄的一层，它具有相当高的流速。有人^[1]在实验室条件下，测量了射流冲击面积附近的漫流流速（测量位置如图 4-9 所示）得出在距井底 0.4 毫米的高度上，漫流流速最大。当射流流速为 16.5 米/秒时，最大漫流流速可达 9.8 米/秒。距井底的高度增加时，漫流流速迅速降低，如图 4-10 所示。

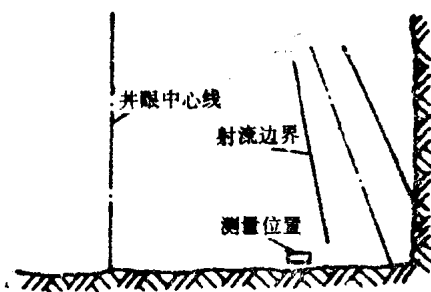


图 4-9 漫流速度测量位置

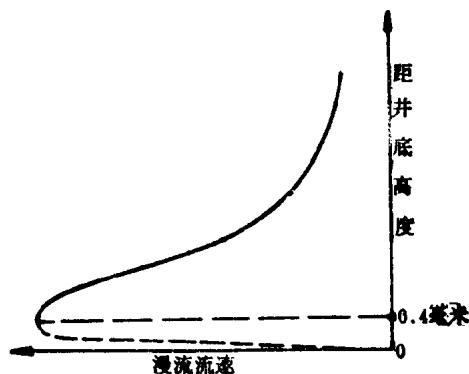


图 4-10 漫流速度纵向分布

具有很高速度的井底漫流，将作用于岩屑一个横向推力或牵引力，从而使岩屑离开井底的原来位置。某些研究^[1]指出，把岩屑冲离井底，漫流起主要作用，而射流的冲击压力作用尚为其次。所以研究漫流是很重要的。

还需指出，测量位置距射流的冲击中心的距离不同，漫流的速度也不同。在射流冲击的面积以内，射流冲击中心的漫流速度为零；离开中心，漫流速度逐渐增大；在射流冲击面积的边缘，漫流速度达到最大。在射流冲击面积以外，漫流流速与距冲击中心的距离成反比，即离冲击中心愈远则漫流流速愈小。实验还证明^[1]，漫流流速与射流喷速和射流流量有如下关系：

$$V_{cr} \propto \sqrt{QV_0} \quad (4-8)$$

(4—8) 式告诉我们，要增大漫流流速，就要增大射流喷速和射流流量。

根据射流清洗井底的原理，为了清洗井底，我们可以得出如下结论：

- (1) 必须增大射流喷速；
- (2) 必须减小喷射距离；
- (3) 必须使射流的 $\sqrt{QV_0}$ 值尽可能增大。

三、射流的水力参数

射流可以把岩屑冲离井底，因而使井底干净，使钻速提高。这只是定性的分析说明。

了实现喷射钻井，在钻井的设计与施工中，要对射流进行定量的计算，这就要计算射流的水力参数。

射流水力参数包括射流的喷射速度、射流冲击力和射流水功率。从衡量射流对井底的清洗效果来看，我们应该计算的是射流到达井底时的水力参数。但是射流速度分布和动压力分布在射流的同一截面上是极不均匀的并且沿着射流的轴线方向在变化，这就使计算复杂化。所以，在工程上，选择射流出口断面作为水力参数的计算位置，即计算射流出口处的喷速、冲击力和水功率。

射流水力参数的计算公式分述如下。

(一) 射流喷射速度 V_0 。

计算射流喷速的通式为

$$V_0 = Q/A_0$$

考虑到工程上常用单位，上式可写作

$$V_0 = 10Q/A_0 \quad (4-9)$$

式中 V_0 ——射流喷速，米/秒；

Q ——通过钻头喷嘴的泥浆排量，升/秒；

A_0 ——喷嘴出口截面积，厘米²。

对于普通的三喷嘴钻头， $A_0 = \frac{3\pi}{4} d_0^2$ ，

如果钻头的喷嘴不是三个或各喷嘴直径不相等，可以使用喷嘴的相当直径 d_e 来计算。当各喷嘴直径相等时，喷嘴相当直径 d_e 的计算公式如下

$$d_e = \sqrt{n} d_0$$

式中 n ——喷嘴数量。

当各喷嘴直径不相等时

$$d_e = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots}$$

(二) 射流冲击力

射流冲击力是指射流在其作用的面积上的总的作用力的大小。前面我们讲了射流对井底的冲击压力。但射流冲击压力与射流冲击力并不是一回事。射流的冲击力是射流的动量发生变化而产生的。根据动量原理，冲量与动量相当，即 $F_i t = m V_0$ ，移项后得 $F_i = m V_0 / t$ 。由于 $m/t = \gamma Q/g$ ，所以

$$F_i = \frac{\gamma Q}{g} V_0$$

消去 V_0 以后可得求射流冲击力的通式，

$$F_i = \frac{\gamma Q^2}{g A_0} = \frac{\rho Q^2}{A_0}$$

若使用工程常用单位, 公式可变成

$$F_j = \frac{\rho Q^2}{100 A_0} \quad (4-10)$$

式中 F_j ——射流冲击力, 千牛;
 ρ ——射流液体密度, 公斤/升;
 Q ——泥浆排量, 升/秒;
 A_0 ——喷嘴出口截面积, 厘米²。

(三) 射流水功率

首先需要指出, 冲离岩屑、清洗井底和破碎岩石, 是要化费能量的。射流在冲离岩屑, 清洗井底和协助钻头破碎岩石的过程中, 实质上是射流不断地对井底和岩屑做功。单位时间内, 射流做功越多, 清洗井底效果就越好, 破碎岩石的效率就越高。单位时间内射流具有的作功能量, 就是射流水功率

即

$$N_j = \frac{\frac{1}{2} m V_0^2}{t} = \frac{1}{2} \frac{m}{t} V_0^2 = \frac{1}{2} \rho Q V_0^2$$

消去 V_0 , 可得射流水功率的通式,

$$N_j = \frac{\rho Q^3}{2 A_0^2}$$

若使用工程常用单位, 公式可变成

$$N_j = \frac{\rho Q^3}{20 A_0^2} \quad (4-11)$$

式中 N_j ——射流水功率, 千瓦;
 ρ ——泥浆密度, 公斤/升;
 Q ——泥浆排量, 升/秒;
 A_0 ——喷嘴出口截面积, 厘米²。

四、钻头水力参数

对喷射钻井有实际意义的是射流水力参数。但射流是泥浆通过钻头喷嘴以后产生的。由于喷嘴对泥浆流动有阻力, 所以喷嘴要损耗一部分能量。在喷射钻井设计中, 我们不仅要计算射流的能量, 而且要考虑喷嘴损耗的能量。能反映出这两部分能量的, 就是钻头的水力参数。

钻头水力参数包括钻头压力降和钻头水功率。

(一) 钻头压力降

钻头压力降, 就是泥浆流过钻头喷嘴以后泥浆压力降低的值。如图 4-11 所示, 在泥浆流过喷嘴前取一点 1, 在泥浆流过喷嘴后取一点 2。点 1 和点 2 处泥浆的压力和速度分别为 P_1 、 V_1 和 P_2 、 V_2 , 喷嘴高度为 H 。根据水力学原理, 我们可以写出 1 点和 2 点的能量方程式

$$H + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h$$

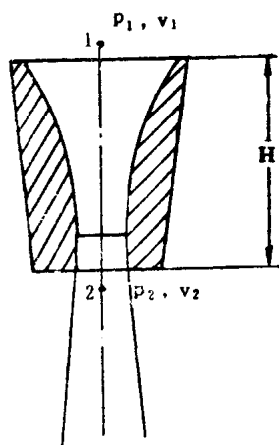


图 4-11 钻头压力降公式
推导图

由于 H 很小可以忽略不计。 V_2 即前面讲过的 V_0 ， V_1 相当于泥浆在钻柱中的流速。在喷射钻井中 V_2 远远大于 V_1 ，所以 V_1^2 与 V_2^2 相比较，也可以忽略。于是公式简化为

$$\frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_0^2}{2g} + h$$

式中的 h 是泥浆流过喷嘴以后损失掉的水头。将 h 以速度水头形式表示，令 $h = \xi \frac{V_0^2}{2g}$ 。 ξ 表示损失掉的水头相当于实际速度水头的 ξ 倍， ξ 就是喷嘴的阻力系数。于是上式可以变为

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = (1 + \xi) \frac{V_0^2}{2g}$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{\left(\sqrt{1 + \xi}\right)^2} \gamma \frac{V_0^2}{2g}$$

令 $\sqrt{\frac{1}{1 + \xi}} = C$ ， C 即为喷嘴的流量系数。关于流量系数的概念我们后面还要讲。由于 $P_1 - P_2$ 就是泥浆流过喷嘴的压力降，以 P_b 表示，则

$$P_b = \frac{\gamma V_0^2}{2C^2 g}$$

或

$$P_b = \frac{\gamma Q^2}{2g C^2 A_0^2}$$

将 $\rho = \gamma/g$ 代入式中，得

$$\Delta P_b = \frac{\rho Q^2}{2C^2 A_0^2} \quad (4-12)$$

式中 P_b ——钻头压降，巴；

ρ ——泥浆密度，公斤/升；

Q ——泥浆排量，升/秒；

A_0 ——喷嘴出口截面积，厘米²；

C ——喷嘴流量系数。

(二) 钻头水功率

钻头水功率是指泥浆流过钻头时所消耗的水力功率。钻头水功率的大部分变成射流水功率，少部分则用于克服喷嘴阻力而作功。根据水力学原理，钻头水功率可用下式表示，

$$N_b = p_b Q = \frac{\rho Q^3}{2C^2 A_0^2}$$

若使用工程常用单位, 则式变为,

$$N_b = \frac{\rho Q^3}{20C^2 A_0^2} \quad (4-13)$$

式中符号和单位, 除 N_b ——钻头水功率, 千瓦外, 其余与 (4-11) 和 (4-12) 式相同。

对比 (4-13) 与 (4-11) 二式, 可以得出

$$N_j = C^2 N_b \quad (4-14)$$

钻头水功率与射流水功率之间相差一个系数 C^2 。这个 C^2 的物理意义是什么呢? 事实上 C^2 表示了喷嘴的能量转换效率。射流水功率是钻头水功率的一部分, 是由钻头水功率转换而来的。在能量转换中, 有能量的损失, 就存在一个转换效率问题。喷嘴能量转换效率以 η_b 表示, 则 $\eta_b = C^2$ 。这样, 我们可以如实地把钻头喷嘴看作是一个能量转换器。为了提高射流的水功率, 必须选择能量转换效率高的喷嘴, 必须提高钻头的水功率。

射流的另两个水力参数, 我们也可以用钻头水力参数来表示, 如下:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2C^2}{\rho}} \cdot \sqrt{P_b} \quad (4-15)$$

$$F_j = 2C^2 A_0 P_b \quad (4-16)$$

由此二式也可以看出, 要提高射流喷速和冲击力, 必须提高钻头压降和喷嘴能量转换效率。

五、喷嘴结构及其水力特征

研究喷嘴结构及其水力特性的意义在于喷射钻井要求射流具有较小的扩散角和较长的等速核长度。而影响射流扩散角和等速核长度的主要因素是喷嘴的结构。这是其一。其二, 喷射钻井要求提高射流的水力参数, 而射流的水力参数是由钻头水力参数转换而来的, 转换效率集中地反映为喷嘴流量系数的大小, 而不同喷嘴其流量系数也是不同的。

喷嘴的水力特性是指它形成的射流的扩散角的大小和等速核长度以及喷嘴流量系数的大小。

(一) 喷嘴的流量系数

在推导 (4-12) 式时, 我们曾令 $\sqrt{\frac{1}{1+\xi}} = C$, 并说明 C 就是喷嘴的流量系数。为什么说它是喷嘴的流量系数呢? 流量系数又是什么意思呢? 下面我们先看一个实验。如图

4-12 所示, 在一个相当大的水罐壁上装有一个喷嘴, 水罐中装有重率为 γ 的液体, 喷嘴出口截面积为 A_0 。罐内液面到喷嘴位置的高度为 H 。实验时应保持 H 不变。由于液面高于喷嘴出口, 所以在液柱压力作用下, 液体将从喷嘴流出。现在要求出喷嘴出口流出的液体的流量为多少。

首先假设液体从喷嘴中流过时没有阻力, 并忽略液体在罐内的流速 (由于罐相当大, 所以这种忽略是可以的)。根据水力学原理, 此时从喷嘴出口流出的液体流速 V_1 与罐内液

体高度 H 的关系为

$$H = \frac{V_i^2}{2g}$$

此时的排量为 Q_i ，它与 V_i 的关系为 $V_i = Q_i / A_0$ ，则

$$H = \frac{Q_i^2}{2gA_0^2}$$

$$Q_i = A_0 \sqrt{2gH} \quad (4-17)$$

这里的 Q_i 称为理论排量，因为它是在喷嘴对液流没有阻力的假设条件下得出的。可是，实际上喷嘴对液流不可能没有阻力，也就是说液流流过喷嘴时要损失一部分能量，所以实际排量并不等于 Q_i 。设损失的水头为 h ，实际流速为 V ，实际排量为 Q ，则

$$H = \frac{V^2}{2g} + h$$

将 h 以速度头形式表示，令 $h = \frac{\xi V^2}{2g}$ ， ξ 表示损失的水头相当于实际速度头的 ξ 倍。 ξ 就是

是喷嘴的阻力系数。则上式可变为

$$H = \frac{V^2}{2g} + \xi \frac{V^2}{2g} = (1 + \xi) \frac{V^2}{2g}$$

实际流速与实际排量的关系为 $V = Q / A_0$ ，所以

$$H = (1 + \xi) \frac{Q^2}{2gA_0^2}$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi}} \cdot A_0 \sqrt{2gH} \quad (4-18)$$

式中 $\sqrt{\frac{1}{1 + \xi}} = C$ ，并由 (4-17) 式知 $A_0 \sqrt{2gH} = Q_i$ ，则

$$Q = CQ_i$$

或

$$Q / Q_i = C$$

这就告诉我们，流量系数的含义是实际流量与理论流量的比值。 C 值越大，实际流量越接近理论流量，说明喷嘴阻力越小，损失的能量也越少，显然， C 总是小于 1。

C 是喷嘴的流量系数， C^2 是喷嘴的能量转换效率。说法不一样，但本质是一个意思，都是说明喷嘴对液流的阻力的大小。为了对喷嘴能量转换效率有一点量的概念，我们对比一下两种喷嘴的能量转换效率。

图 4-13 为一直角进口的喷嘴。据实验测量，它的流量系数 $C = 0.663$ ，则 $\eta_b = 0.663^2 = 0.44$ 。此值告诉我们，若使用这种喷嘴，则钻头水功率只有 44% 变成射流水功率，而 56% 损耗在克服喷嘴的阻力上。如果我们使用另一种叫做等变速喷嘴，其流量系数 $C = 0.98$ ， $\eta_b = 0.98^2 = 0.96$ ，说明损耗的能量只有 4%，而射流水功率则占钻头水功率的 96%。