

# 涡流式水力降低井底压差机制及现状

杨宝刚<sup>1</sup>, 陈大祺<sup>2</sup>, 张伟<sup>3</sup>, 朱海燕<sup>4</sup>, 赵靖影<sup>4</sup>

1. 中国石油技术开发公司, 北京 100028
2. 中石油川庆钻探公司钻采工程技术研究院, 四川广汉 618300
3. 中石化集团公司胜利油田井下作业公司, 山东东营 257077
4. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

**摘要** 石油与天然气钻探实践表明,降低井底压差,减小岩屑的压持效应,并尽量实现井底的欠平衡条件,可以显著提高钻井的机械钻速。本文在介绍涡流式水力降压技术的原理的基础上,综述了环空涡流泵、涡流式水力降压短节和涡流钻头 etc 涡流式水力降压工具的结构特点、降压效果和研发应用情况,采用计算流体力学软件对涡流 PDC(聚晶金刚石复合片)钻头的井底流场进行了数值模拟研究。结果发现,涡流钻头与井壁间的密封是降压的关键,推荐上返喷嘴的倾角为 150°—180°,推荐上返流量为 32%以上,为涡流钻头的研发提供理论指导。

**关键词** 涡流;井底压差;环空涡流泵;涡流式水力降压短节;涡流钻头

**中图分类号** TE21

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.23.010

## Depressurization Mechanism of the Vortex Methods and Its Current Development status

YANG Baogang<sup>1</sup>, CHEN Daqi<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>3</sup>, ZHU Haiyan<sup>4</sup>, ZHAO Jingying<sup>4</sup>

1. China Petroleum Technoloy and Development Corporation, Beijing 100028, China
2. Chuanqing Drilling and Production Technology Research Institute, Guanghan 618300, Sichuan Province, China
3. Shengli Oilfield Downhole Service Company, Sinopec, Dongying 257237, Shandong Province, China
4. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract** The drilling practices of oil and gas wells have proved that reducing the Bottom-Hole Differential Pressure (BHDP) is able to significantly improve the Rate of Penetration (ROP), reducing the drilling cost. The structure features, depressurization capacities, and the current researches and developments of Equivalent Circulation Density (ECD) reduction tool, vortex joint, and vortex bit are summarized based on the analysis of the depressurization theory of the vortex tools. The numerical simulation analysis is carried out to study the bottom hole flow field of the vortex Polycrystalline Diamond Compact (PDC) bit using the CFD software, the results show that the critical factor affecting the vortex bit depressurization capacity is the reliable sealing of the annulus between the vortex bit and the borehole walls. 150°—180° is recommended for the angle of the reverse nozzle, and more than 32% of the total circulation drilling fluid is also recommended as the upflow, providing the theoretical guide for the development of the vortex bit.

**Keywords** vortex; BHDP; ECD reduction tool; vortex joint; vortex bit

### 0 引言

井底压差是指井底静液柱压力与地层孔隙压力之差,是影响钻速提高的重要因素之一。室内实验和现场实践证明,减小井底压差钻速会显著提高。这主要是由两个方面原因造

成的,一个是减小压差对井底岩屑的压持效应,使岩屑及时脱离井底,减少重复破碎;另一方面减小岩石的抗破碎强度和塑性,同时改善井底岩石的受力条件,使岩石由冲击剪切破碎转变成拉伸剪切破碎,提高钻速。因此在钻井过程中,在

收稿日期:2012-01-18;修回日期:2012-05-31

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51134004)

作者简介:杨宝刚,工程师,研究方向为石油技术、钻采装备进出口;电子信箱:yangbg@cnpc.com.cn

保证钻井安全的前提下,尽量降低钻井液的密度,使井底达到近平衡或欠平衡状态,减小岩屑的压持效应,改变井底岩石的受力状态,提高机械钻速。

降低井底压差的途径通常是降低钻井液密度,但钻井液密度必须满足安全钻井的需要。国内外学者在如何降低钻井液井底压差方面,做了大量的研究工作,设计了很多井底减压工具,其中以涡流式水力降压工具、射流式水力降压工具和脉冲射流降压工具为主。力求在保持整个井筒钻井液液柱压力不变的情况下,降低钻头作用面的钻井液液柱压力,从而实现在保持井壁稳定的前提下,降低井底压差,提高机械钻速。

射流式水力降压工具采用射流泵抽汲井底流体而降低井底压差,不需要较高的旋转速度,但需要单独的动力液驱动射流泵。Hughes 等<sup>[1-9]</sup>设计的套管固定式环空射流泵,对于异常低压油气藏(储层压力为 0.48—0.84g/cm<sup>3</sup>),可实现井底约 1.38MPa 的欠平衡<sup>[6]</sup>。孙伟良<sup>[7]</sup>设计的分流钻头,当井壁间隙为 2mm,且动力液为总流量的 80%时,可以降低井底压力 1.22MPa。Hosie 等<sup>[8-10]</sup>和 Hassen<sup>[11-12]</sup>均设计了一种随钻柱旋转的环空射流泵,法国石油勘探技术研究协会研制出一种反循环降压短节<sup>[13]</sup>,Lott 设计了一种加长喷嘴的射流泵钻头<sup>[14]</sup>。这些工具由于具有射流泵结构和相应的动力液流道,并且需要密封工具与套管或井壁间的环空,结构均较为复杂,较难实现,仍处于设计研发阶段。

脉冲射流是在井底产生含有负压脉冲序列的射流,以此降低井底压差,没有高转速的限制,因此在近年来发展迅速,现场应用良好,但其效果有限。常用的有 Tempress 技术公司研制开发的 hydroPulse™ 负压脉冲工具<sup>[15]</sup>、Waltech 公司的负

压脉冲射流工具<sup>[16]</sup>、胜利油田钻井院研制的 SLMC 型机械阻断式脉冲钻井工具<sup>[17]</sup>、杨永印等<sup>[18]</sup>研制的 LPMS-I 型脉冲调制器样机、王瑞和等<sup>[19]</sup>根据自激振荡调制射流法设计的吸附式脉冲射流工具和李根生等<sup>[20]</sup>研制的水力脉冲空化射流工具。

涡流式水力降压工具通过流体的高速旋转形成的漩涡来降低井底压力,不需要单独的动力液,但对旋转零件的抗研磨能力要求较高,其比射流降压工具更易实现。作为一种新型的降压工具,本文主要研究其原理和不同结构特点,并对各个结构进行深入分析,为涡流式水力降压工具的发展提供理论依据。

## 1 涡流式水力降压机制

涡流降压是利用涡流的原理,由钻具带动钻井液在井内高速旋转,使钻井液在井内产生强烈的涡旋,对井底产生抽吸作用,造成井底压差的减小,降低钻井液对井底的压持效应从而提高机械钻速。涡流降压工具主要可分为环空涡流泵、井底涡流降压短节和井底涡流钻头 3 种类型(图 1)。环空涡流泵通常固定在套管上,且与套管间的环空采用封隔器密封,涡流泵高速旋转,抽汲井下流体,实现降压。井底涡流降压短节安装在钻头与钻铤之间,其上设置有若干个倾斜向上的射流喷嘴,通过射流喷嘴的切向速度产生漩涡,降低井底压差。井底涡流钻头是将现有钻头的水孔出口方向,由与钻头轴线夹角为 0°—60°,调整为与钻头轴线夹角为 90°—180°,泥浆流经钻头水孔后,由原先的向下直接冲击井底,改变成背离井底方向倾斜向上,在钻头旋转速度的带动下,泥浆从水孔中射出后,随钻头做圆周运动,在钻头附近的流体产生强烈的漩涡,降低井底压力。

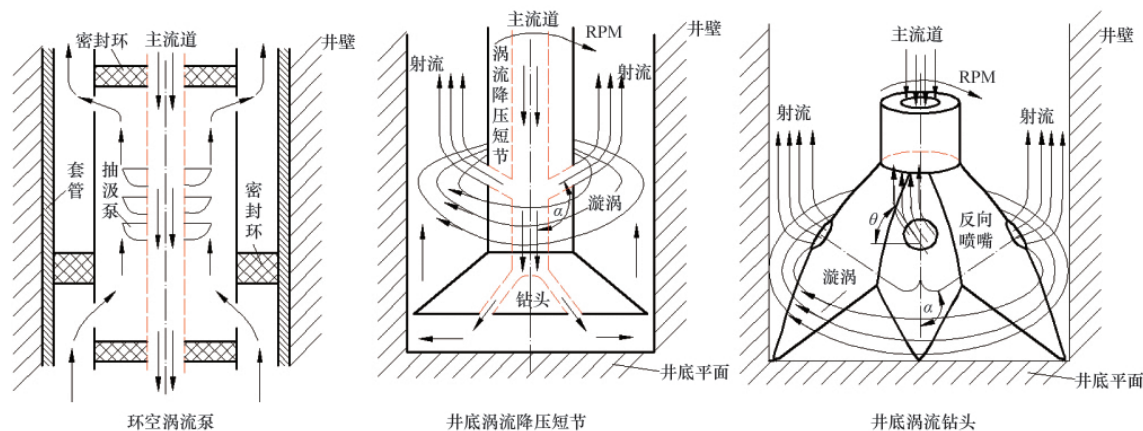


图 1 涡流降压工具的降压机制

Fig. 1 Depressurization mechanism of vortex tools

涡流产生的压力降与旋转速度的平方成正比<sup>[21]</sup>,即

$$p_e = \frac{1}{2} \rho v^2 \cos^2 \theta [1 - (r_0/r_w)^2] \quad (1)$$

射流在轴向的动量分量产生的压力降:

$$p_r = \rho q v \cos \theta / s_w \quad (2)$$

因此,井底总压降:

$$p = p_e + p_r = \frac{1}{2} \rho v^2 \cos^2 \theta [1 - (r_0/r_w)^2] + \rho q v \cos \theta / s_w \quad (3)$$

式中, $p_e$ 为涡流压降; $\rho$ 为钻井液密度; $r_w$ 为井眼半径; $r_0$ 为旋流出口半径; $v$ 为旋转流体的速度; $\theta$ 为流体流动方向与旋转切向的夹角; $A_r$ 为反向喷嘴出口截面积; $s_w$ 为井底截面积; $q_r$ 为反向喷嘴排量; $\theta$ 为反向喷嘴中心线与井眼轴线的夹角。

## 2 涡流式水力降压技术

### 2.1 环空涡流泵

Bern 等<sup>[22-24]</sup>研制出一种降低当量循环密度工具 (ECDRT) 可以解决由于摩擦损失引起的环空流体压力的增加, 通过降低流体静压头总和解决岩屑载荷问题 (图 2), 该工具实际上是一个环空涡流泵, 采用上部的涡轮马达, 将钻井液的液能转换成机械能。涡轮马达驱动下部多级混流泵转动, 提供能量给回流液体, 产生环空压差。多级混流泵的叶片呈右螺旋形, 随钻柱顺时针转动时, 混流泵腔室压力减小, 抽汲含有钻井液的上返岩屑 (图 3)<sup>[25]</sup>。环形密封与套管保持长期接触, 封隔 ECDRT 与套管间环空, 确保所有回流液体和岩屑都通过混流泵。ECDRT 是一个自激活工具, 通过钻井液循环提供动力, 不能用在气体钻井或充气钻井。可以处理包括岩屑在内的密度最高为  $1.8\text{g/cm}^3$  的钻井液。工具标准外径  $208.3\text{mm}$ , 马达外径  $172\text{mm}$ , 可下入直径为  $244.5\text{—}339.7\text{mm}$  的套管柱内, 能处理循环速率高达  $45.5\text{L/s}$  的钻井液。

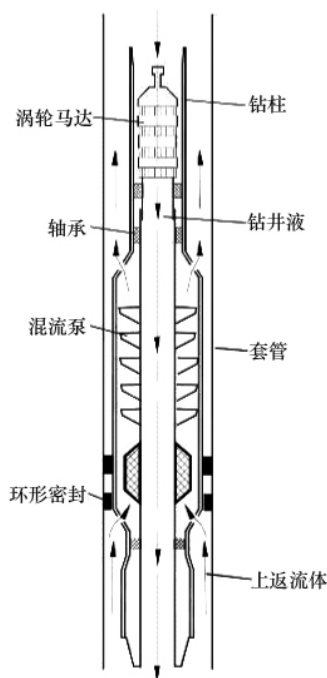


图 2 降低当量循环密度工具  
Fig. 2 Equivalent circulation density reduction tool

样机试验数据表明, 该工具有最低启动流速  $15.2\text{L/s}$ , 随着流速的增加, 负压以平方形式稳定增加, 当流速为  $41.7\text{L/s}$  时,  $1.5\text{g/cm}^3$  钻井液的压力降低  $2.89\text{MPa}$ 。同时涡轮中的压力损失和泵的压力恢复都是二次曲线关系, 当流速大于  $18.93\text{L/s}$  时, 效率可以维持在  $18\%\text{—}22\%$  之间。该工具于 2004 年和 2006 年在俄克拉荷马州进行了两次现场试验, 第一次试验发现对于  $1.17\text{g/cm}^3$  的钻井液, 没有使用该工具时估计钻井液当量循环密度 (ECD) 为  $1.19\text{g/cm}^3$ , 使用工具后实际 ECD 为  $1.06\text{—}1.07\text{g/cm}^3$ , 可减少  $0.12\text{—}0.14\text{g/cm}^3$  的当量循环密度, 井底压力降低  $1.77\text{—}2.07\text{MPa}$ 。第二次没用工具时, ECD 约为

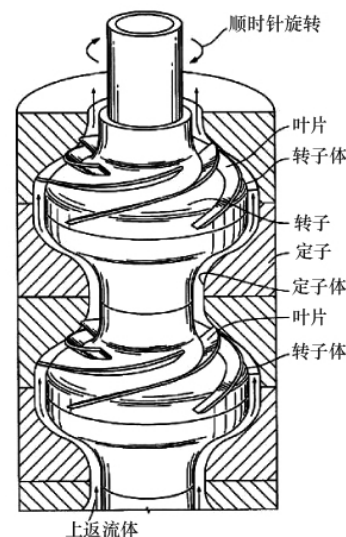


图 3 多级混流泵  
Fig. 3 Multi-stage pump

$1.25\text{g/cm}^3$ , 使用后实际 ECD 为  $1.17\text{g/cm}^3$ , 减少了约  $0.09\text{g/cm}^3$  的当量循环密度, 相当于减少了约  $1.02\text{MPa}$  的井底压力。然而这两次测试中, 该工具在工作  $7\text{—}10\text{h}$  后, ECD 数据最后出现不稳定趋势, 工具使用性能开始下降。

### 2.2 涡流式水力降压短节

Reed<sup>[26]</sup>设计了一种近钻头的混流降压工具 (图 4), 其安装在钻头与钻铤之间, 结构与 ECDRT 有一定的相似性。该工具上端设置有行星齿轮机构, 主要用于钻柱相对于外筒体的旋转。该工具下端通过一柔性环与井壁接触, 密封井壁环空, 使上返钻井液只能从工具内部上返。流体在工具内的流动过程与 ECDRT 相同。其上部的钻井液马达驱动工具旋转, 工具上的混流泵 (图 5) 旋转抽汲井底钻井液, 实现降压作用。该工具直接与钻头相连, 限制了工具的旋转速度, 从而降压效果有限。同时其放置在井底, 极易被上部井壁的掉块或坍塌的岩屑卡死, 这是该工具没有普遍推广的主要原因。

徐华义等<sup>[27-28]</sup>研制出一种井底降压差短节 (图 6)。该工具由钻铤加工而成, 两端均为母扣, 安装在钻头和钻铤之间。在短节两侧壁上沿切线, 位置相反处加工两个喷嘴腔, 在喷嘴腔中安装喷嘴。外有螺纹、中心有喷孔的喷嘴装入射流孔下端的螺纹中, 并以卡簧卡牢。喷嘴直径为  $5\text{—}9\text{mm}$ , 与井眼轴线夹角为  $120^\circ\text{—}150^\circ$ , 与水平面夹角为  $0^\circ\text{—}90^\circ$ 。喷嘴腔使钻井液反向喷出并产生涡流。该工具在四川盆地坪西 1 井  $2663.44\text{—}2763.86\text{m}$  井深处的浅灰色灰岩地层, 进行了现场试验。在钻井液密度均为  $1.38\text{g/cm}^3$  条件下, 使用井底降压差短节可提高机械钻速  $12\%$ , 返出的钻屑具有颗粒明显增大、代表性好的特征。

2005 年, 杜君研制了一种井底涡流器, 其结构与徐华义的降压短节基本相同, 不同之处在于, 其喷嘴与井眼轴线夹角  $90^\circ$ , 径向夹角为  $30^\circ$ 。喷嘴压力降为  $5\text{MPa}$ 、转速为  $250\text{r/min}$  时, 测点 O 和 D 之间可产生  $0.015\text{MPa}$  的压降。该工具在中原

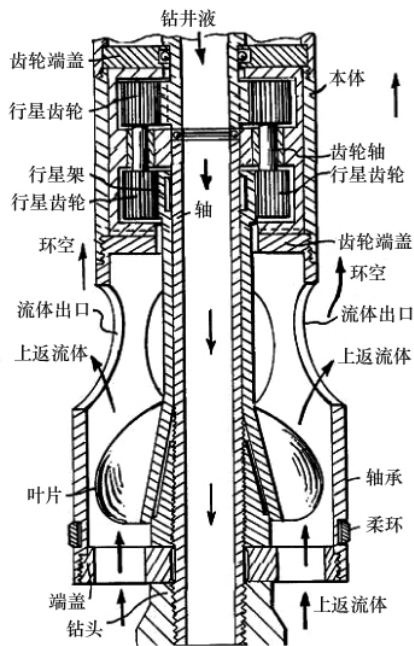


图4 混流降压工具

Fig. 4 Multivane fan depressurization apparatus

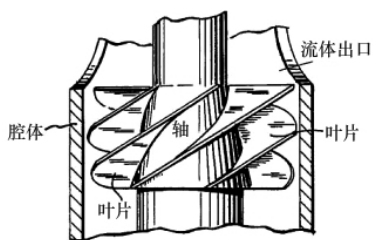


图5 多级混流泵

Fig. 5 Multivane fan tool

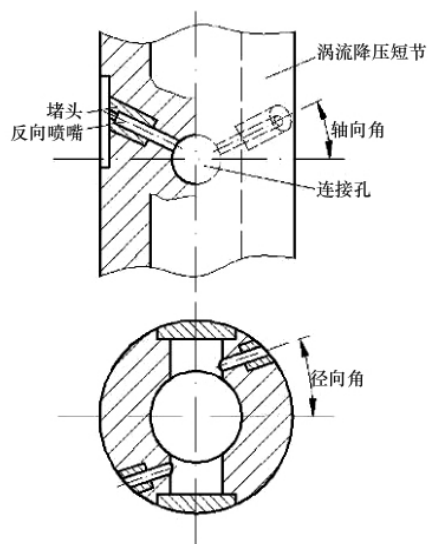


图6 井底降压短节

Fig. 6 Downhole pressure reduction tool

油田文269-6井的1500m和新文72-189井的2000m进行使用,机械钻速比临井提高20%以上<sup>[29]</sup>。

### 2.3 涡流钻头

#### 2.3.1 反喷三牙轮钻头

辽河石油勘探局勘探指挥部1979年研制出一种反喷三牙轮钻头,该钻头3个喷嘴中2个喷嘴朝下,1个喷嘴向上(与轴线夹角为180°,图7)<sup>[30]</sup>。钻头两牙轮间本体上平行于钻头中心线被铣出一个宽约50mm的平面,平面上垂直于中心线钻3个直径30mm的孔,分别与原水眼连通。连通下喷嘴的孔的中心线距钻头密封台阶20mm,连通上喷嘴的孔的中心线距钻头密封台阶35mm。改造后的两只下喷嘴和一只上喷嘴直径均为13mm。该钻头分别在4口井的相同地层进行了现场应用。在850—1600m井深范围内,使用相似的钻井参数,机械钻速为5.5—8.78m/h。和改造前的钻头相比,在2口邻井相同地层中进行对比,在相似的钻井参数情况下,平均进尺提高3.3倍,机械钻速提高1.8倍。同时返出的岩屑颗粒较喷射钻头大,岩屑多,便于沉淀,有助于降低钻井液的含砂量。

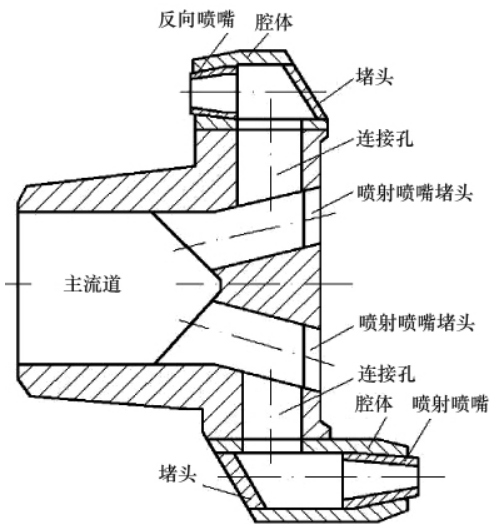


图7 反喷三牙轮钻头

Fig 7 Reverse nozzle roller bit

#### 2.3.2 内外体钻头

中原油田的杜晓瑞研制出一种内外体钻头(图8)<sup>[31]</sup>。该新型钻头由接头、内钻头和外套头组成,外套头通过钢球与接头联结一起,并能够在接头上上下下移动。内钻头上部有与钻头轴线夹120°的反喷嘴,下部有平喷嘴。外套头主要用于在下钻过程中,防止内钻头的水平喷嘴喷射井壁。平喷嘴产生的喷射流沿井底水平外射,这时井底压力场很弱,携岩能力强,不存在岩屑重复破碎现象,提高了钻速。反喷嘴在井底产生涡旋,减小井底压差,加速岩屑上返。

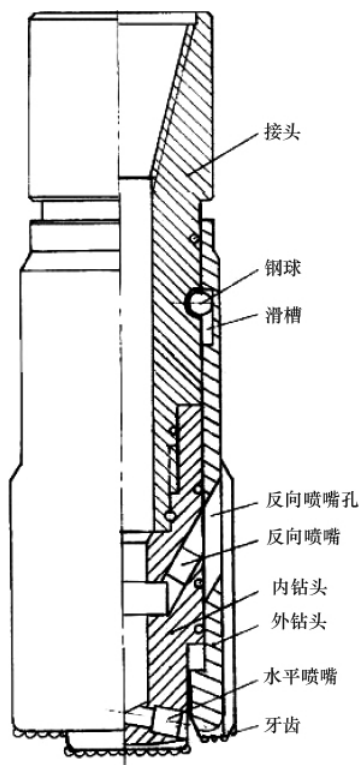


图 8 内外体钻头  
Fig. 8 Reverse bit with double bodies

### 2.3.3 反喷钻头

Lamin 等在常规 PDC 钻头和牙轮钻头的基础上,研制出一种反喷 PDC 钻头(图 9)和反喷三牙轮钻头(图 10)<sup>[32]</sup>。

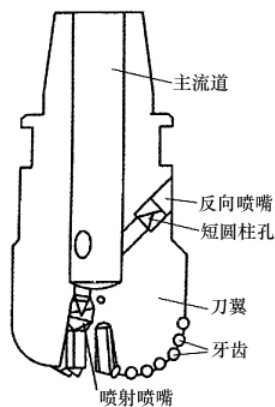


图 9 反喷 PDC 钻头  
Fig. 9 Reverse nozzle PDC bit

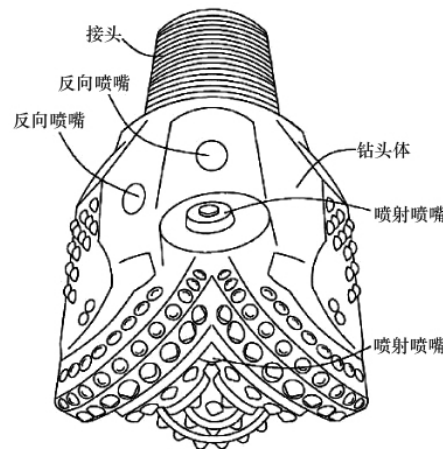


图 10 反喷三牙轮钻头  
Fig. 10 Reverse nozzle tricone bit

该钻头同时设置若干个反向喷嘴 70 和向下喷射喷嘴 130。反向喷嘴和钻头轴线成  $135^{\circ}$ — $180^{\circ}$ ,与钻头旋转的反方向呈  $50^{\circ}$ — $75^{\circ}$ ,反喷嘴总流量为钻井液总流量的 15%—25%。反向喷嘴内设置有长度为 25—35mm 的圆柱形短节,以使流体在该处产生文丘里效应。为最大程度降低钻头作用面附件的压力,反喷嘴出口离井底距离最好为 100—150mm。单个或多个反喷嘴制造出的反向流体在破岩面和反喷嘴之间形成低压区,该低压区又促进反向流体的形成。这些不同角度布置的反喷嘴使上返流体产生螺旋流动。反向流道可以是直线、螺旋线或渐近线,其横截面也可以是圆形、椭圆形或其他形状。

### 2.4 讨论

表 1 为涡流式水力降压工具的统计表,可以看出,环空涡流泵可将井底压力降低 2MPa 左右,是降压短节和涡流钻头的 10 倍以上,具有良好的降压效果;涡流式水力降压短节仅在反向喷嘴上下形成压降;涡流钻头的降压能力为 0.1—0.3MPa 之间;环空涡流泵现场试验具有良好的降压效果,涡流式水力降压短节和涡流钻头的降压效果有限。

涡流式水力降压工具通过流体的高速旋转形成的漩流来降低井底压力,比较容易实现,不会受到岩屑颗粒大小的限制,但由于钻头的旋转速度一般在 50—300r/min 之间,故要形成较大的井底压力必需采用额外的工具提高降压工具的旋转速度。ECDRT 采用高速马达驱动下部带螺旋叶片的混流泵来降低井下环空压力,能够降低约  $0.14\text{g/cm}^3$  井底当量循

表 1 涡流降压工具的结构及参数统计表

Table 1 Structure and parameters of vortex tools

工具名称	结构特点	降压效果	应用情况
环空涡流泵	螺旋叶片混流泵、轴承、环形密封	1.77—2.07MPa,降低约 $0.14\text{g/cm}^3$ 的泥浆密度	现场实验
涡流式水力降压短节	上返喷嘴: $\delta=90^{\circ}$ — $150^{\circ}$ , $\theta=0^{\circ}$ — $90^{\circ}$	反向喷嘴上下压降 0.015MPa,钻速提高 20%	现场实验
反喷三牙轮钻头	上返喷嘴: $\delta=180^{\circ}$ , $\theta=0^{\circ}$	钻速提高 1.8 倍	现场实验
涡流钻头	内外体钻头 上返喷嘴: $\delta=150^{\circ}$ , $\theta=0^{\circ}$ ,井底水平喷嘴	未知	结构设计
	反喷钻头 上返喷嘴: $\delta=90^{\circ}$ — $180^{\circ}$ , $\theta=0^{\circ}$ — $90^{\circ}$	流量 62.5%上返为 0.12MPa;100%上返为 0.3MPa	结构设计

环密度,即降低 2.07MPa 的井底压力,降压效果较好。该工具是一个可移动便携式工具,可以根据需要通过一次短的起下钻安装在 213m 以内井深处的钻柱上,作业方便,对钻井过程影响小,不需要组装时间。因含有坚硬固相的钻井液与高速螺旋叶片接触,对其冲击和磨损严重,致使该工具寿命较短;同时封隔器易发生泄露,导致流体向上下环形密封间的环空泄露,影响井下动力钻具(BHA)的工作。因此,在设计时,仍需要对这些问题进行进一步的完善。

井底降压差短节依靠反向喷嘴上下形成的压降来加速岩屑的上返,结构简单,使用方便,直接与钻头连接。该工具在 2600 井深的灰岩地层使用时,钻速比邻井提高 12% 以上,且返出的钻屑颗粒明显增大。由于该工具直接安装在钻头上,转速受到钻头转速的限制。在喷嘴压力降为 5MPa 时,转速为 250r/min 时,工具上下压差仅为 0.015MPa。同时该工具喷嘴离井底距离较远,由涡旋引起的压力降并不能很好的作用到井底,在井底几乎没有降压效果,不能有效减小井底岩屑的压持效应。钻头钻速的增加实际上并不是由于压差的减小而产生的,而是由反向射流加速携岩,提高携岩效率引起的。因此,该工具目前并没有得到推广应用。

在钻头上设计的反向喷嘴使一部分钻井液反向喷出,利用涡流原理降低井底压力,对提高机械钻速积极有利。反向流体还具有巨大的压力和速度,在破岩面形成空穴或减小钻头破岩面附近的压力,改变岩屑的应力状态,从而迅速带走岩屑。因其产生的涡流压降直接作用于钻头的作用面,故其使用效果优于井底降压差短节。反喷牙轮钻头在 1000m 左右的浅地层有较好的提速和排屑效果,机械钻速和进尺都有明显提高。但在深井提速效果未知。钻头的上喷水眼与钻头轴线平行,容易刺坏接头,影响使用寿命。该反喷钻头只有 3 个喷嘴,喷嘴数量相对不足,下喷嘴冷却润滑牙齿和上喷嘴反喷降压引流都无法充分发挥作用,影响使用效果。内外体合成式钻头结构较为复杂,可靠性不强。对于反喷嘴钻头而言,流体在全部上返时,井底压力可达到 0.3MPa,降压效果仍然有限,而实际上为了冷却钻头、携带岩屑和防止钻头泥包,钻井液不可能全部上返,因此反喷钻头的降压效果,并不理想。

环空涡流泵和涡流式水力降压短节降压的关键在于提高旋转部件的密封可靠性。对于涡流钻头而言,其降压的关键在于密封钻头与井壁间的间隙,选择合理的流量比例。为了进一步研究涡流钻头的降压机理,采用流体计算软件 CFD 对 8 1/2" 涡流 PDC 的井底流场进行了数值模拟研究。该钻头由 5 个刀翼、5 个反向喷嘴、3 个向下喷射喷嘴和 1 个主流道组成。3 个喷射喷嘴的直径均为 15mm,喷射角均为 15°。井底围压取为 30MPa,流量取为 33L/s,钻头旋转速度取为 300r/min。如图 11 所示,为涡流钻头的井底流场速度矢量图。可以看出,井底纵截面速度场大致可分为切向旋转区、径向漫流区、回流区、漩涡区、附壁上返区和周向漩涡区。流体在反向喷嘴和向下喷射喷嘴内速度较高,在反向喷嘴下方产生严重回流,形成回流区。周向漩涡区主要是由于井底流体高速旋转

形成的负压漩涡所引起的,其对降压是有利的,但易引起流体的回流,设计时应尽量将该区域靠近井底平面。井底回流区致使岩屑随回流流体返回井底,导致岩屑沉淀,不能及时排除岩屑,同时降低上返流体涡流和喷射的降压效果,因此如何减少流体的回流是涡流钻头降压效果的关键。回流区的存在是由于轴向倾角产生的横向射流速度引起的,因此应尽量增大反向喷嘴的轴向倾角。由于流体由钻柱进入钻头主流道,在此过程中流体由上而下流动,当进入反向喷嘴后,流动方向变化了  $\theta$  角,产生较大的局部水头损失。因此,应采用较大的  $\theta$  角,推荐为  $150^{\circ}$ — $180^{\circ}$ 。

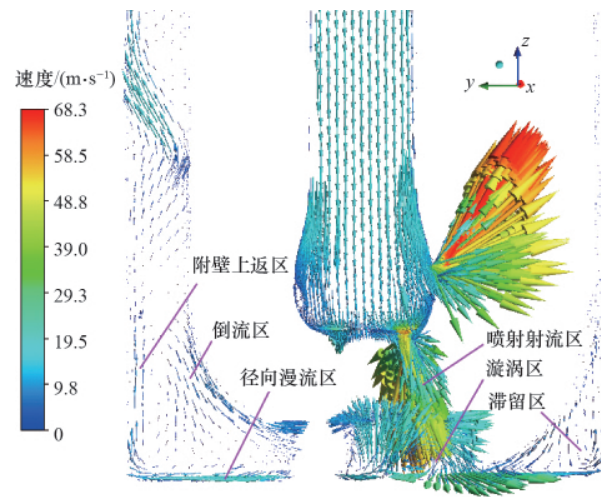


图 11 井底纵截面流场速度矢量图  
Fig. 11 Velocity vector diagram of the longitudinal section flow field

图 12 为上返流量分别占总流量的 25%、62.5% 和 100% 的井底流场压力分布。当上返流量为总流量的 25% 时,井底负压处于反向喷嘴与井底之间,井底仍处于正压状态;上返流量的增加,井底负压显著增大,负压区位于钻头反向喷嘴下方的全部区域;当钻井液流量全部上返时,井底负压最大约为 0.3MPa,实际上由于需要对钻头的冷却和携带岩屑的作用,流量并不可能全部上返。因此可知,上返流量 25% 时,负

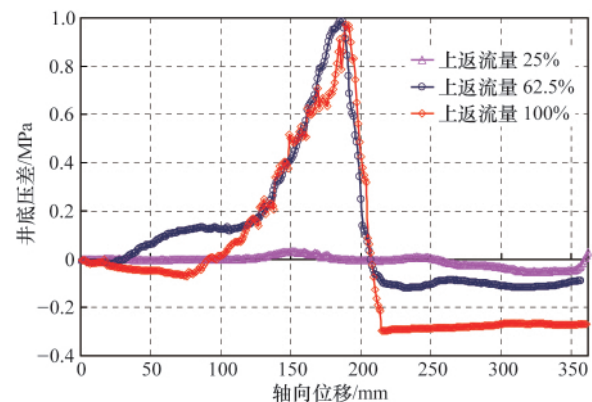


图 12 上返流量与井底压差间的关系  
Fig. 12 Relationship between flow ratio and the BHPD

压出现在环空,井底仍存在正压,上返流量升到到 32%时,井底出现负压。为了实现井底的负压环境,推荐涡流钻头的上返流量为 32%以上。

### 3 结论

涡流式水力降压工具主要包括环空涡流泵、涡流式水力降压短节和涡流钻头三种类型。旋转速度决定了其井底的降压能力。环空涡流泵采用高速钻井液马达驱动下部带螺旋叶片的混流泵来降低井下环空压力,能够降低 2.07MPa 的井底压力,降压效果较好,但寿命只有 10h 左右,因此,对其叶片的耐磨性和环形密封的可靠性仍需要做更加深入的研究。涡流式水力降压短节和涡流钻头均连接在钻柱上,通过反向喷嘴的涡流和喷射作用降低井底压力。受到钻柱旋转速度限制,涡流式水力降压短节仅在反向喷嘴上下降低 0.015MPa 压力,对井底几乎没有降压效果;涡流钻头可降低井底压力 0.1—0.3MPa,当流量全部通过反向喷嘴上返时,降低 0.3MPa。涡流钻头与井壁间的密封是降压的关键,推荐上返喷嘴的倾角  $\theta$  为  $150^\circ$ — $180^\circ$ ,推荐上返流量为 32%以上。

### 参考文献 (References)

- [1] Hughes W J, Renfro J J. Down hole drilling assembly with independent jet pump: EP, 1288434 A1[P]. 2003a.
- [2] Hughes W J, Renfro J J. Down hole drilling assembly with independent jet pump: US, 20030042048[P]. 2003b.
- [3] Hughes W J. Method and apparatus for inducing under balanced drilling conditions using an injection tool attached to a concentric string of casing: US, 6769498[P]. 2004.
- [4] Hughes W J, Renfro J J. Down hole drilling assembly with independent jet pump: US, 6877571[P]. 2005a.
- [5] Hughes W J, Renfro J J. Down hole drilling assembly with concentric casing actuated jet pump: US, 6899188[P]. 2005b.
- [6] Suryanarayana P V, Hasan ABM K, Hughes W J. Technical feasibility and applicability of a concentric jet pump in underbalanced drilling[C]. SPE 91595. SPE/IADC Underbalanced Technology Conference and Exhibition. Houston, Texas, 11–12 October 2004.
- [7] 孙伟良. 钻头分流降低井底压力机理的研究[M]. 东营: 中国石油大学(华东), 2010.  
Sun Weiliang. Mechanism study on the bottomhole pressure reduction by drilling fluid shunt on bit [M]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [8] Hosie D, Bansal R K, Moyes P B. Apparatus and method to reduce fluid pressure in a wellbore: GB, 2406116[P]. 2005a.
- [9] Hosie D, Bansal R K, Moyes P B. Apparatus and method to reduce fluid pressure in a wellbore: GB, 6837313[P]. 2005b.
- [10] Hosie D, Bansal R K, Moyes P B. Apparatus and method to reduce fluid pressure in a wellbore: US, 7395877[P]. 2008.
- [11] Hassen B. Underbalance drilling tool and method: WO, 014649 [P]. 2002.
- [12] Hassen B. Underbalanced drilling tool and method. / Outil de forage en sous-pression, et methode connexe: CA, 2315969[P]. 2008.
- [13] Association de Recherche sur les Techniques d'Exploitation du Petrol (ARTEP). Unique tool speeds diamond bit drilling [J]. *World Oil*, 1978, 187(5): 74.
- [14] Lott W G. Jet pump drilling apparatus and method: US, 5775443 [P]. 1998.
- [15] Kollé J, Mark M. Hydropulses increase drilling penetration rates [J]. *Oil & Gas Journal*, 1999(5): 29.
- [16] Glowka D. Optimization of bit hydraulic configurations [J]. *SPE Journal*, 1983, 23(1): 21–32.
- [17] 王智锋. 负压脉冲钻井技术理论及方法 [J]. 石油钻探技术, 2005, 27(6): 13–15.  
Wang Zhifeng. *Oil Drilling & Production Technonlog*, 2005, 27 (6): 13–15.
- [18] 杨永印, 吴志坚, 沈忠厚, 等. 低压脉冲射流的调制机理及调制器振动模拟[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(3): 40–42.  
Yang Yongyin, Wu Zhijian, Shen Zhonghou, et al. *Journal of the University of Petroleum: Natural Science Edition*, 2003, 27(3): 40–42.
- [19] Wang R H, Du Y K, Ni H J, et al. Hydrodynamic analysis of suck-in pulsed jet in well drilling [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, 23(1): 34–41.
- [20] Li G, Shi H, Liao H, et al. Hydraulic pulsed cavitating jet-assisted drilling[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2009, 27(2): 197–207.
- [21] 徐华义, 吴华, 聂翠平. 井底降压差短节显著提高机械钻速 [J]. 石油钻探技术, 1998, 26(1): 41–45.  
Xu Huayi, Wu Hua, Nie Cuiping. *Petroleum Drilling Techniques*, 1998, 26(1): 41–45.
- [22] Bern P A, Hosie D, Bansal R K, et al. A new downhole tool for ECD reduction [C]. SPE/IADC 79821, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands, February 19–21, 2003.
- [23] Bern P A, Armagost W K, Bansal R K. Managed pressure drilling with the ECD reduction tool [C]. SPE 89737, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA., 26–29 September, 2004.
- [24] Bansal R K, Brunnert D, Todd R, et al. Demonstrating managed-pressure drilling with the ECD reduction tool [C]. SPE/IADC 105599, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands, February 20–22, 2007.
- [25] Hosie D, Bansal R K, Moyes P B. Apparatus and method to reduce fluid pressure in a wellbore: US, 7395877[P]. 2008.
- [26] Reed J A. Apparatus for reducing hydro-static pressure at the drill bit: US, 4744426[P]. 1988.
- [27] 徐华义, 吴华, 聂翠平. 井底降压差短节: CN, 2314087Y[P]. 1999.  
Xu Huayi, Wu Hua, Nie Cuiping. Bottomhole differential pressure decreasing joint: CN, 2314087[P]. 1999.
- [28] 吴华, 徐华义. 一种降井底压差短节: CN, 2320783Y[P]. 1999.  
Wu Hua, Xu Huayi. A bottomhole differential pressure decreasing joint: CN, 2320783[P]. 1999.
- [29] 杜君. 井底涡旋器设计的理论与试验研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2005.  
Du Jun. Theory and experiment study of well bottom vortex machine[D]. Chengdu: SouthWest Petroleum University, 2005.
- [30] 辽河石油勘探局勘探指挥部科技科. 介绍一种改装“反喷”钻头的方法[J]. 石油勘探与开发, 1979(4): 66–68.  
Liaohe Petroleum Exploration Department Exploration Headquarters (LPEDEH). *Petroleum Expoloration and Development*, 1979(4): 66–68.
- [31] 杜晓瑞. 一种新型钻头: CN, 98210390[P]. 1999.  
Du Xiaorui. A new bit: CN, 98210390 [P]. 1999.
- [32] Lamin S B, Graham C. Reverse nozzle drill bit: US, 20100147594[P]. 2010.

(责任编辑 岳臣)