

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.04.015

## 射流泵降低井底压差工具研究现状及性能分析

袁光宇

(中国海洋石油总公司,北京 100010)

**摘要:** 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,可以显著提高机械钻速。在介绍射流泵技术原理的基础上,综述了环空射流泵、射流泵短节和射流泵钻头射流泵工具的结构特点、降压效果和研究应用现状,并分析了影响各种降压工具降压性能的关键因素。环空射流泵采用单独的动力液驱动射流泵动作,井筒环空压力可降低当量钻井液密度 0.16~0.52 kg/L;射流泵短节降压范围有限,当射流泵出口距离井底 2 m 时,对井底环空几乎没有降压效果;井壁间隙是射流泵钻头降压能力的关键,当井壁间隙为 1 mm 时,射流泵钻头可使井底压力降低 1.86 MPa;当井壁间隙增大到 3 mm 以上时,射流泵钻头几乎没有降压效果。研究结果为射流泵降压工具的研发提供了理论指导。

**关键词:** 水力射流 井底压力 射流泵 射流泵短节 射流泵钻头

**中图分类号:** TE933<sup>+</sup>.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)04-0076-05

## Current Status of Research and Performance Analysis of Depressure Tools for Jet Pump

Yuan Guangyu

(China National Offshore Oil Corporation, Beijing, 100010, China)

**Abstract:** According to the experience of oil/gas drilling, ROP in well drilling can be improved significantly when the bottom hole pressure drops, chip hold down effect of cuttings was reduced, and under balanced condition was achieved. This paper summarized the structure features, depressurization capacities, and the current status of researching and developing jet pump, jet pump joint and jet pump bit based on the depressure principle of jet pump. The key factors that affect the depressurization capacity were analyzed. Annulus jet pump is actuated by a jet pump. It can reduce the equivalent circulation density about 0.16~0.52 kg/L. The depressure ability of the jet pump joint is lower than that of jet pump, and there is almost no pressure drop when the outlet of the jet pump is two meters off the bottom hole two meters. The clearance between bit and borehole wall is critical to the depressure ability of the jet pump bit. When the bit clearance is 1 mm, about 1.86 MPa is reduced; however, when the bit clearance is increased to more than 3 mm, the pressure is almost unchangeable. The results can provide the theoretical guidance for the development of the jet pump depressure tools.

**Key words:** hydraulic jet; bottomhole pressure; jet pump; jet pump depressure joint; jet pump bit

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,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,并研制出了涡流降压工具、脉冲射流泵降压工具和射流泵降压工具等。涡流降压工具通过流体高速旋转形成的漩涡来降低井底压力,对旋转零件

的抗研磨能力要求较高<sup>[1-2]</sup>。脉冲射流是在井底产

**收稿日期:** 2011-08-24; **改回日期:** 2012-06-19。

**作者简介:** 袁光宇(1959—),男,天津人,1982年毕业于华东石油学院钻井工程专业,2007年获中欧国际工商学院工商管理硕士学位,高级工程师,现任中国海洋石油总公司总经理助理、中海石油有限公司执行副总裁。

**联系方式:** (010)84525897, yuanguy@cnooc.com.cn。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“气体钻井技术基础研究”(编号:51134004)和国家科技重大专项“多枝导流适度出砂技术”(编号:2011ZX05024-003-02)部分研究内容。

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,近年来发展迅速,现场应用良好<sup>[3-5]</sup>。射流泵降压工具通过射流泵的降压抽汲作用,加速岩屑上返,降低井底压力,不需要较高的转速,但需要单独的动力液驱动射流泵动作。为给射流泵降压工具的进一步研究提供参考,笔者主要探讨了射流泵降压原理和不同降压工具的结构特点。

## 1 射流泵水力降压原理

射流泵水力降压是在井内环空或井底采用中心射流泵或环形射流泵结构,实现降压携岩的目的。中心射流泵由喷嘴、吸入管、喉管和扩散管组成(见图 1)。与中心射流泵相比,环形射流泵的吸入管和喉管处于同一轴线上,被吸入流体不需要改变方向,更加适合抽汲含有高固相质量分数和较大粒度固体的流体。低压高速动力液从喷嘴喷出,将井底含有岩屑的钻井液吸入喉管。动力液与井底含岩屑的钻井液在喉管内充分混合,进行动量和质量的交换。在喉管末端,岩屑及钻井液仍具有很高的流速(动能),进入扩散管后,流速降低,部分动能转换为压能,从井眼环空上返到地面。由于喷嘴喷出的钻井液压力较低,井底的岩屑和钻井液被吸入喉管并即时上返,使得井底的压力始终处于较低的状态,实现降压的目的<sup>[6]</sup>。

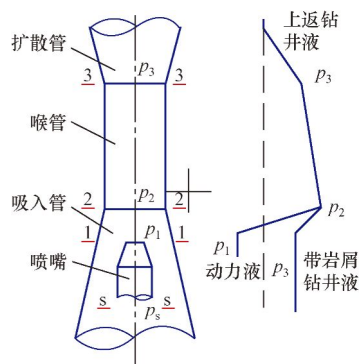


图 1 中心射流泵水力降压原理

Fig. 1 Hydraulic depressurization principle of the central jet pump

## 2 射流泵水力降压工具

### 2.1 环空射流泵

#### 2.1.1 套管固定式

Hughes 等人<sup>[7]</sup>采用独立的中心射流泵结构,

研制出一种可以实现井底欠平衡的井下钻井装置(见图 2)。该装置由封隔器固定在 $\phi 244.5$  mm 生产套管上,钻井过程中,单相动力液进入 $\phi 244.5$  mm 生产套管和 $\phi 177.8$  mm 同心套管之间的环形空间,驱动转换叶片向内弯曲,转换叶片填充区密封转换叶片与钻柱间的环形空间,使从井底上返的钻井液和岩屑,只能进入射流泵的喉管。动力液经射流泵喷嘴喷出后,速度增加,将动量传递给进入喉管的上返流体,使上返流体获得足够的压力而排出地面。该装置目前仍处于研发阶段,没有见到现场应用的报道。

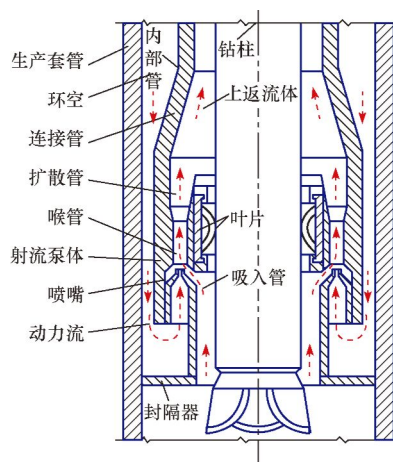


图 2 套管固定式环空射流泵

Fig. 2 Annular jet pump fixed inside casing

#### 2.1.2 套管移动式

2005 年, P. V. Suryanarayana 等人<sup>[8]</sup>在整体式中心射流泵的基础上,将同心套管设计成可移动式,通过移动套管来驱动中心射流泵工作。同心套管与生产套管同心,分为上下 2 个部分。工作时,独立的动力液驱动同心套管的上部,使其向下移动,与下部的同心管相连接,组成了一个整体式中心射流泵。转换叶片作为射流泵装置中唯一的运动部件,需要有足够的韧性,以使其能够产生足够的弯曲,密封其与钻柱之间的环空;同时,为了防止含有岩屑的上返钻井液从其与钻柱间的环空通过,转换叶片需要具有较高的强度,因此转换叶片的设计是决定该装置可行性的关键。对于储层压力为 0.48~0.84 kg/L 的异常低压油气藏,该工具可在保持上部井筒压力的同时,实现井底的欠平衡条件。该装置增加了一层同心套管及配套工具,钻井成本增加,工具下放和回收所需时间较长,操作复杂,且在下放和回收时井内压力难以控制。

### 2.1.3 钻柱旋转式

H. David 等人<sup>[9]</sup>在研制以涡流原理降低当量循环密度工具的同时,设计了一种根据射流原理降低当量循环密度的工具。该工具上下两端与钻柱连接,并与钻柱一起旋转,其下部的滑动封隔器和密封环空,可沿套管内壁旋转(见图3)。钻井过程中,钻井液沿工具中心向下流动,一小部分流体作为动力液通过射流泵的入口进入喷嘴,压力降低,速度升高;另一部分流体向井底流动,携带岩屑。由于环空被滑动封隔器密封,从井底上返的含岩屑的钻井液只能沿工具内部的入口向上运动,在射流泵动力液的作用下,抽汲加速,实现降压。

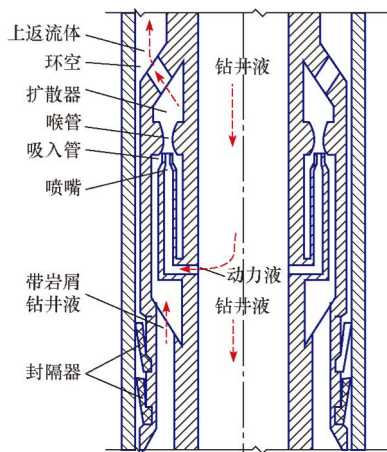


图3 钻柱旋转式环空射流泵

Fig. 3 Annular jet pump with drill string rotation

B. Hassen<sup>[10]</sup>将封隔器和滚动轴承结构相结合,提出了一种新的降低当量循环密度的工具。射流泵位于工具内的一侧,另一侧为若干个竖直接通的旁通。封隔器封闭该工具与生产套管间的环空,其内部设计有滚动轴承副,该工具通过滚动轴承与钻柱同时旋转。向上流动的动力液经喷嘴后减压加速,抽汲由环空上返的含有岩屑的钻井液。钻柱旋转式环空射流泵随钻柱一起旋转,其上的封隔器在封隔井下环空的同时,还需要随钻柱旋转和向下滑动,因此封隔器是该工具设计的难点。

## 2.2 射流降压短节

### 2.2.1 中心射流泵降压短节

法国石油勘探技术研究协会研制出一种反循环工具<sup>[11]</sup>,由上部接头和底部减压接头2部分组成。上部接头控制着钻井液流向,一个起旁通阀作用的封隔器把一部分钻井液引导到接头上方的环空。因

此,钻杆中的钻井液进入工具后分成2股独立液流,一股向上运动到环形空间,另一股向下流向钻头面。向上运动的钻井液作为中心射流泵的动力液;向下运动流经钻头面的钻井液流在清洗井底之后,从钻头内部上返。中心射流泵的喷嘴降低了动力液的压力,提高钻头面钻井液流速,有效降低流体静压头并清除岩屑。室内试验表明<sup>[12]</sup>,射流泵降压工具仅在工具下部一定区域范围内产生作用,距离井底过远,其降压效果将波及不到井底,当射流泵出口距离井底2 m时,对井底环空几乎没有降压效果。

### 2.2.2 环形射流泵降压短节

环形射流泵降压短节由带调节塞的稳定器和环形射流泵组成<sup>[13]</sup>(见图4),带调节塞的稳定器用来隔离近钻头空间和上部环空。利用向上的喷嘴抽吸流体降低压力或提供负压,在近钻头部位降低压力使其欠平衡,上部仍维持原来压力,提高钻速。环形射流泵降压短节采用环形射流泵,允许较大颗粒岩屑的通过,可进一步提高排屑效率,但其结构复杂,可靠性不强。

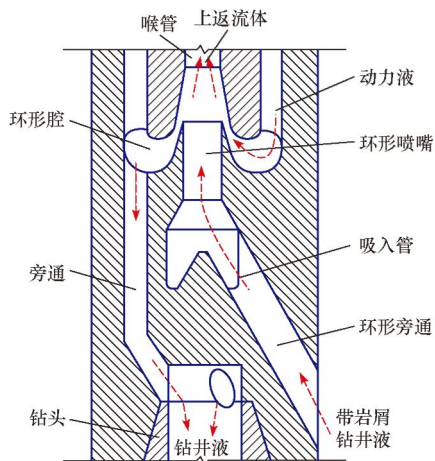


图4 环形射流泵降压短节

Fig. 4 Annulus jet pump depressure joint

## 2.3 射流泵钻头

### 2.3.1 分流钻头

孙伟良<sup>[14]</sup>研制了一种 $\phi 215.9$  mm 分流钻头(见图5)。分流流道和分流喷嘴组成一中心射流泵,作为排屑槽位于钻头的排屑槽内。分流喷嘴位于分流流道的吸入口处;分流喷嘴和井底喷嘴与钻头主流道相连,可通过关闭井底喷嘴的数量来达到分流的目的。钻头体圆周外表面布置有保径齿。钻井液在钻头处分流,分出的钻井液经过分流流道直



接流向环空,在井底处形成局部负压,减小压持效应。该钻头在围压为 10 MPa、流量为 30 L/s、井壁间隙为 1 mm、分流流道直径 15 mm、喷嘴直径为 8 mm 时,井底最大压降为 1.86 MPa;当钻头与井壁的间隙为 0 时,井底最大压降为 2.60 MPa。分流钻头对钻头与井壁间的间隙的依赖性较大,且分流上返喷嘴在井底伸出较长一段,严重阻碍井底岩屑的移动,不利于排屑。

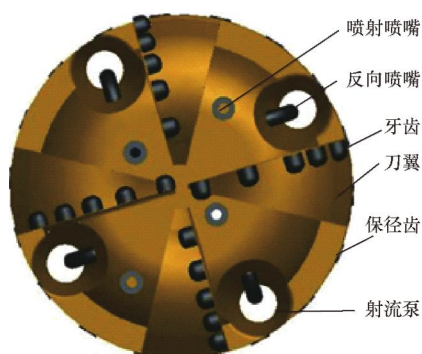


图 5 分流钻头结构

Fig. 5 Structure of bypass flow bit

### 2.3.2 欠平衡喷射钻头

M. D. Mueller 等<sup>[15]</sup>设计了一种欠平衡喷射钻头,该钻头没有刀翼,在钻头中心采用一个较大的中心射流泵结构,来降低钻头作用面上的压力。岩屑通过射流泵内的排屑孔排出井底。该钻头结构复杂,目前仍处于概念设计阶段,对于具体的结构,还有待进一步研究。

### 2.3.3 双喷嘴分流钻头

W. G. Lott<sup>[16]</sup>设计了一种双喷嘴喷射钻头(见图 6)。该钻头在常规牙轮钻头和 PDC 钻头的基础上,设计了一个圆柱形加长喷嘴,该加长喷嘴两端分别为射流泵喷嘴和井底喷射喷嘴;同时,将钻头的内部流道设计成与加长喷嘴相配合的射流泵结构,使钻头在保持向上喷射降压的过程中,实现向下喷射功能。改变射流泵喷嘴和井底喷射喷嘴的孔径,可实现钻井液的分流。钻井液从钻柱内进入钻头的主流道,经圆锥形的钻井液转向装置进入加长喷嘴。在加长喷嘴内,一部分流体从井底喷射喷嘴喷出,清洗钻头牙齿,并携带岩屑;另一部分流体从射流泵喷嘴喷射,高速低压流体将井底含有岩屑的钻井液从加长喷嘴与射流泵组件之间的环空吸入,从而降低井底压差。

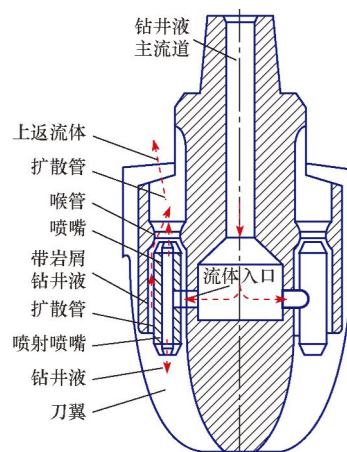


图 6 射流泵钻头结构

Fig. 6 Structure of jet pump bit

## 3 工具特点对比

环空射流泵通过封隔器固定在套管上,通过降低环空射流泵下方井筒内的压力而降低井底压差。射流降压短节安装在钻头的上方,不影响井下工具、钻头和钻井液的正常工作,不妨碍正常的起下钻和钻进作业。射流泵钻头是在常规钻头的基础上,采用中心射流泵结构实现降压,不需要额外的工具及起下钻操作,无活动件,与其他 2 种降压工具相比,结构简单,可靠性高。表 1 为射流泵降压工具的结构和性能对比,可以看出,环空射流泵降压效果较好,优于其他 2 种射流工具;射流泵钻头由于存在井壁间隙,并没有完全发挥出射流泵的降压效果。

## 4 结 论

1) 水力射流泵降压工具采用射流泵原理降低井底压力,整体处于结构设计阶段,现场应用较少,还有待于进一步研究。

2) 如何保证环空射流泵的封隔器和转换叶片、射流降压短节的强度和如何密封射流泵钻头与井壁间的间隙是研究的难点。

3) 在射流泵降压机理和射流泵降压工具结构分析的基础上,建议采用环形射流泵结构,避免中心射流泵易堵塞的问题。

4) 可将涡流降压原理和射流水力降压原理结合起来,上返喷嘴喷射出的部分高速钻井液随钻头旋转,在井底钻头周围形成高速负压漩涡,实现降压;其余部分流体仍通过射流泵的喉管,产生文丘里效应,实现降压。

表 1 射流泵降压工具结构和性能对比

Table 1 Compare of structure and performance of the jet pump depressure tools

工具	类型	转动方式	结构特点	降压效果	应用情况
环空射流泵	套管固定式	不转动	中心套管、固定封隔器,中心射流泵/文丘里管	0.48 kg/L 储层压力的欠平衡钻井	结构及原理设计
	钻柱旋转式	转动	滑动封隔器/滚动轴承副+固定封隔器,中心射流泵		结构设计
射流降压短节	反循环工具	转动	中心/环形射流泵,封隔器		结构设计
	分流射流工具	转动	中心射流泵	0.45 MPa (L=0)	室内清水试验
射流泵钻头	分流钻头	转动	中心射流泵,喷射喷嘴	井壁间隙为 1 mm 时,井底压差降低 1.86 MPa	室内清水试验
	欠平衡喷射钻头	转动	中心射流泵,螺旋形岩屑挡板		结构设计
	双喷嘴分流钻头	转动	中心射流泵,射流泵喷嘴和井底喷射喷嘴一体式		结构设计

## 参 考 文 献

## References

- [1] Bern P A, Armagost W K, Bansal R K. Managed pressure drilling with the ECD reduction tool[R]. SPE 89737, 2004.
- [2] 杜君. 井底涡旋器设计的理论与试验研究[D]. 成都: 西南石油学院石油工程学院, 2005.  
Du Jun. Theory and experiment study of well bottom vortex machine[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, School of Petroleum Engineering, 2005.
- [3] Kollé Jack, Mark Marvin. Hydropulses increase drilling penetration rates[J]. Oil & Gas Journal, 1999, 97(13): 33-37.
- [4] 王智锋. 负压脉冲钻井技术理论及方法[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(6): 13-15.  
Wang Zhifeng. Discussion on theory & methodology of suction-pulse drilling technique[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(6): 13-15.
- [5] Li G, Shi H, Liao H, et al. Hydraulic pulsed cavitating jet-assisted drilling[J]. Petroleum Science and Technology, 2009, 27(2): 197-207.
- [6] Gruppig A W, Coppes J L R, Groot J G. Fundamentals of oil well jet pumping[J]. SPE Production Engineering, 1988, 3(1): 9-14.
- [7] Hughes William James, Renfro Jimmie Josh. Down hole drilling assembly with independent jet pump; US, 6877571[P]. 2005-04-12.
- [8] Suryanarayana P V, Hughes W James. Technical feasibility and applicability of a concentric jet pump in underbalanced drilling [R]. SPE 91595, 2004.
- [9] Hosie David, Bansal R K, Moyes Peter B. Apparatus and method to reduce fluid pressure in a wellbore; US, 6837313[P]. 2005-01-04.
- [10] Barry Hassen. Underbalance drilling tool and method; WO, 2002014649[P]. 2002-02-21.
- [11] Association de Recherche sur les Techniques d'Exploitation du Petrol. Unique tool speeds diamond bit drilling[J]. World Oil, 1978, 187(5): 74.
- [12] 郑锋辉, 于水杰, 李根生, 等. 射流式水力降压实验研究[J]. 石油机械, 2008, 36(7): 4-6.  
Zheng Fenghui, Yu Shuijie, Li Gensheng, et al. Experimental study of jet hydraulic pressure drawdown[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(7): 4-6.
- [13] Hooper D W. Annulus bypass peripheral nozzle jet pump pressure differential drilling tool and method for well drilling; US, 4630691[P]. 1986-12-33.
- [14] 孙伟良. 钻头分流降低井底压力机理的研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东)石油工程学院, 2010.  
Sun Weiliang. Mechanism study on the bottomhole pressure reduction by drilling fluid shunt on bit[D]. Dongying: China University of Petroleum(Huadong), School of Petroleum Engineering, 2010.
- [15] Mueller M D, Jacobson William O. Underbalance jet pump drilling method; US, 5355967[P]. 1994-10-18.
- [16] Lott W G. Jet pump drilling apparatus and method; US, 5775443[P]. 1998-07-07.