

钻井提速用振动冲击工具研究进展

甘 心

(中石化中原石油工程有限公司钻井工程技术研究院,河南濮阳 457001)

摘要:振动冲击工具作为钻井提速的有效手段之一,正在得到行业内的广泛认同和重视。本文通过详细列举轴向振动冲击器、扭转冲击器和复合冲击器等工具的最新研究进展,明确了振动冲击工具通过合理利用钻井液水力能量并将其转化为冲击破岩能量,可以有效地提高破岩效率、改善钻头破岩环境、降低破岩阻力。并就现场应用情况来看,能够明显地提高钻井过程中的机械钻速,缩短钻井周期。

关键词:油气钻井;提速工具;轴向冲击;扭转冲击;复合冲击

中图分类号:TE242 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)02-0085-09

Advances in vibration impactors for drilling acceleration

GAN Xin

(Drilling Engineering and Technology Research Institute, Zhongyuan Petroleum Engineering Co. Ltd., SINOPEC, Puyang Henan 457001, China)

Abstract: As one of the direct and effective means of increasing ROP and efficiency, the vibration impactor is widely recognized and valued in the oil-gas drilling area. This article describes in detail the latest research progress on several kinds of vibration impactors such as the axial impactor, the torsional impactor and the compound impactor, and illustrates that the vibration impactor can effectively enhance the energy of breaking rock, improve the bit condition of breaking rock, and reduce the resistance of breaking rock through reasonable use and conversion of mud hydraulic energy. Field application has shown that the vibration impactor can improve the rate of penetration, and shorten the drilling period.

Key words: oil-gas well; speedup tool; axial impact; torsional impact; compound impact

0 引言

钻井工程最终目标是以最低的成本钻出高质量的井眼,而在钻头成本和钻机作业费用不变的条件下,若要实施低成本钻井施工,必须在尽可能少的时间内,获得更多的进尺。实践表明,振动冲击工具可以在不增加地面设备能力的条件下合理利用并转化泥浆水力能量进行辅助破岩,其作为降本增效的最直接有效手段之一,已经被行业内广泛认同和重视^[1-2]。自20世纪以来,美、苏、中、德等国对钻井提速工具进行了大量的研究和创新,试验和应用结果表明振动冲击工具具有以下几个优点:(1)

提高硬地层机械钻速和进尺深度;(2)有效控制井眼轨迹,提高井身质量;(3)缓解钻柱弯曲和恶性振动;(4)改善钻头破岩环境,提高破岩能量,降低破岩阻力。

本文将油气钻井提速用振动冲击工具按作用方式分为轴向振动冲击工具、扭转冲击工具和复合冲击工具3大类,并对每种工具的工作原理、技术特点、性能指标、应用效果及发展方向进行介绍,为振动冲击工具更好地发挥提速效果提供借鉴。

收稿日期:2020-03-18; 修回日期:2020-11-10 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.02.012

基金项目:中国石化科技攻关项目“四川盆地深探井钻完井及测试关键技术研究”(编号:JP16034)

作者简介:甘心,男,汉族,1987年生,副研究员,地质工程专业,博士,主要从事钻井提速技术及工具研究工作,河南省濮阳市中原东路462号, ganx55.oszy@sinopec.com。

引用格式:甘心. 钻井提速用振动冲击工具研究进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 85-93.

GAN Xin. Advances in vibration impactors for drilling acceleration[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 85-93.

1 轴向振动冲击工具

经过几十年的发展,在油气钻井领域得到成功应用的轴向振动冲击工具主要有射流式冲击器、射吸式冲击器、自激振荡冲击器、脉冲式提速器和旋冲螺杆等。

1.1 射流式冲击器

射流式冲击器又称射流式液动锤(见图1),主要利用一个双稳态射流元件的射流附壁切换特性,控制高压液体交替进入冲击器缸体上下腔,从而推动活塞冲锤往复运动^[3]。其结构尺寸及性能参数如表1所示。

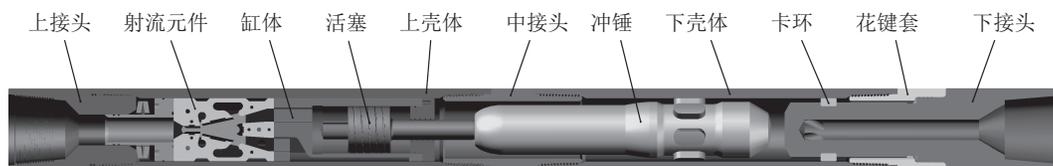


图1 射流式冲击器结构示意图

Fig.1 Structure of the fluid-jet impactor

表1 射流式冲击器性能参数

Table 1 Main technical parameters of the fluid-jet impactor

工具外径/mm	工具长度/mm	排量/(L·s ⁻¹)	工具压降/MPa	冲击功/J	冲击频率/Hz
178	2800	20~32	1~3	200~550	10~32
203	3112	35~55	1~3	200~550	10~32
229	3112	35~55	1~3	200~750	10~32

射流式冲击器具有结构简单、运动件少、工作稳定、不受井底背压影响等特点,与此同时也存在射流元件易冲蚀、液体能量利用率低等不足。近几年吉林大学对射流式冲击器内部的射流元件(见图2)的结构与材质进行了改进优化^[4],将射流元件从传统三体式结构改进成脸谱型两体式结构,将原有底板和盖板的长条形上下腔控制信号孔改为在基板上采用电火花方式加工而成的矩形截面控制道,并且在材质上全部采用YG11C硬质合金。中国石化石油工程技术研究院对缸体、砧子的结构与材质进行了改进,提高了工具的使用寿命,并且通过优化性能参数,首次与PDC钻头配合在6000 m井段实现成功应用^[5-6]。



(a) 传统三体式

(b) 脸谱型两体式

图2 射流元件

Fig.2 Fluid-jet device

射流式冲击器在新疆塔里木、内蒙古和重庆涪陵等地区70余口井的硬脆性地层进行了应用,平均机械钻速提高30%以上^[7]。

当前,射流式冲击器正朝着改进元件结构及材质、降低压降、提高油基泥浆适应性等方向持续开展攻关研究。

1.2 射吸式冲击器

射吸式冲击器结构如图3所示。

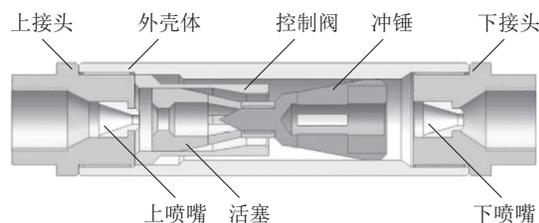


图3 射吸式冲击器结构示意图

Fig.3 Structure of the fluid ejection type impactor

该冲击器主要利用高压液流喷射时产生的卷吸作用,使控制阀和活塞的上下腔产生交变压力差,从而推动活塞和冲锤往复运动。其主要技术特点有:(1)无弹簧元件,运动部件少;(2)结构简单,拆装方便;(3)液体在腔体内畅通性好;(4)对密封

性能要求低^[8]。

近年来,东北石油大学、西安石油大学和中国石油大学(北京)等高校都在开展射吸式冲击器研究。其中,中国石油大学(北京)运用计算流体力学软件对射吸式冲击器内部流速场和压力场进行了分析,进一步优化了冲击器排量、喷嘴直径、喷嘴结构、冲程等参数^[9]。东北石油大学通过室内性能测试,明确了冲击功和冲击频率会随着排量和冲锤质量的增大而增大,研制的 $\varnothing 100$ mm射吸式冲击器总长 1.2 m、工作频率为 1000~4000 次/min(16~66 Hz)、冲击力为 500~1000 N、压降 1~2 MPa,该冲击器在新疆塔里木地区配合 PDC 钻头进行了现场应用,机械钻速同比常规钻具组合提高 133%^[10-11]。西安石油大学对射吸式冲击器喷嘴、控制阀和活塞等零件进行了优化设计,引入激光熔覆技术,提高了零部件耐磨性,研制的 $\varnothing 178$ mm射吸式冲击器工作频率 8.8 Hz、冲击功 134.3 J、压降 2.56 MPa,该冲击器在新疆玛湖地区配合 PDC 钻头进行了现场应用,机械钻速同比常规钻具组合提高 31%^[12]。

当前,射吸式冲击器应用规模较小,需要在配流行程优化、关键零部件材质优选、工作稳定性和钻井液能量利用率提升等方面开展深入的攻关。

1.3 自激振荡冲击器

自激振荡冲击器结构如图 4 所示。

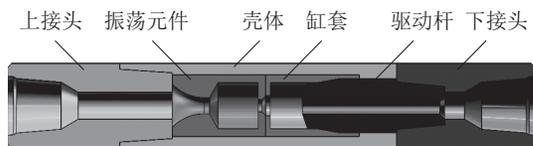


图 4 自激振荡冲击器结构示意图

Fig.4 Structure of the self-excited oscillating impactor

该冲击器主要利用钻井液流经自激振荡腔时产生的高频低幅水力脉冲,作用在冲击传递杆上端,并对下部钻具或钻头进行柔和的液力冲击^[13-14]。其性能参数见表 2。自激振荡冲击器主要技术特点有:(1)可靠性和安全性好,结构简单,无冲击锤等活动件;(2)适应性强,对钻井液性能无特殊要求;(3)能够改善井底岩石状态并净化井底。

中国石油大学(华东)研制的自激振荡式冲击器近几年在新疆塔里木地区进行了多次应用,机械钻速与常规回转钻进相比提高 50% 以上,钻时减少 45% 以上。其中在 TH10435 井,使用螺杆+自激振

表 2 自激振荡冲击器性能参数

Table 2 Main technical parameters of the self-excited oscillating impactor

工具外径/mm	工具长度/mm	最小排量/(L·s ⁻¹)	工具压降/MPa	轴向冲击力/kN	冲击频率/Hz
178	1230	32	1~2		
203	1320	42	2~3	5~20	40~47
230	1460	50	3~4		

荡旋冲工具+PDC 钻头钻井方式,机械钻速 22.63 m/h,较邻井复合钻进提高 60.9%^[15]。

目前,自激振荡式冲击器正朝着精简工具长度、拓展冲击作用方式、提高与螺杆钻具匹配性等方面不断完善,并且应用规模也正在逐步增加。与此同时,研究人员也在积极融入脉冲粒子射流理念,研发自吸环空流体式脉冲粒子射流冲击器^[16-17]。

1.4 脉冲式提速器

脉冲式提速器的结构如图 5 所示。

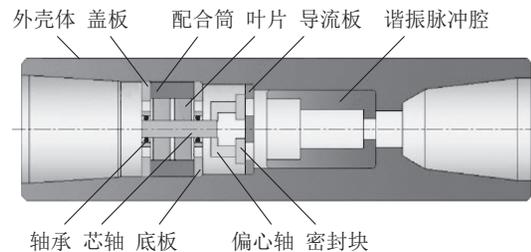


图 5 脉冲式提速器结构示意图

Fig.5 Structure of the adjustable frequency pulse impactor

该提速器通过将偏心轴与导流板周期性连通形成的机械强制脉冲与钻井液流经谐振脉冲腔产生的自激振荡脉冲相结合,使常规连续流动的钻井液转换成脉冲射流,提高钻头破岩能量和效率。其主要技术特点有:(1)高压射流可以辅助破岩,提高破岩效率;(2)减轻井底岩屑压持效应,避免岩屑重复破碎;(3)井底压力波动可以改善待破碎层压差。

近年来,中石油钻井工程技术研究院和中石化华东工程公司都在开展脉冲式提速器研究。其中,中国石油钻井工程技术研究院研制的 $\varnothing 178$ mm脉冲式提速器总长 810 mm、压降 1.5~2.5 MPa、压力脉冲 2~4 MPa。该工具脉冲幅值随排量的增大而增大,并且在相同排量下,低脉冲频率对应的脉冲幅值大,高脉冲频率对应的脉冲幅值小^[18]。中国石油钻井工程技术研究院研制的脉冲式提速器近几

年在吐哈、大庆、苏里格和川东北等地区现场应用,平均提高25%以上,火成岩等坚硬地层钻速提高50%。中石化华东工程公司研制的 $\text{O}165\text{ mm}$ 和 $\text{O}203\text{ mm}$ 两种规格脉冲式提速器在江苏油田应用9口井,平均机械钻速提高26.08%^[19]。

目前,脉冲式提速器受限于腔体畅通性不足、密封性能要求高、钻井液性能要求苛刻等因素,未能进行大规模应用。

1.5 旋冲螺杆

旋冲螺杆又称螺杆冲击器,由动力总成、可弯角外壳总成和冲击锤总成组成。动力总成提供转速和输出扭矩,通过传动轴传递给冲击锤总成内部凸轮,使凸轮和滚轮之间形成差动,并产生3~4倍于转速的冲击次数,从而实现冲击功能与螺杆集

成一体化应用。其主要技术特点有:(1)冲击功与钻压有关,冲击频率与马达转速有关;(2)工作时外筒产生轴向振荡;(3)纯机械传动,无泥浆压力脉冲,对泥浆性能无限制^[20]。

目前中石化石油工程技术研究院、胜利石油工程公司钻井工艺研究院、中国石油大学(华东)等科研院所都在开展旋冲螺杆的研制^[21-23]。其中,中石化石油工程技术研究院研制的螺杆冲击器如图6所示,具体技术参数如表3所示。胜利石油工程公司钻井工艺研究院研制的机械式旋冲螺杆(见图7)外径172 mm,配套螺杆马达头数7:8,冲击频率4~8 Hz,工作扭矩3.8~7.8 kN·m,工作钻压15~50 kN,冲程5 mm,并且冲击功与钻压和冲程成正比,工作扭矩与钻压和冲程成反比。

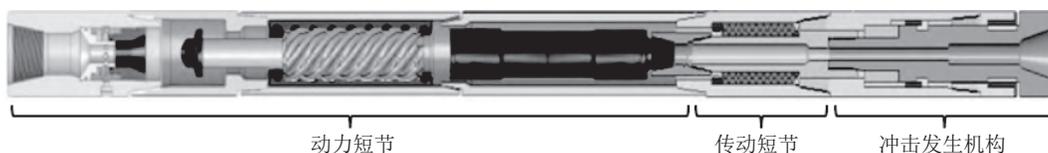


图6 螺杆冲击器结构示意图

Fig.6 Structure of the impactor based on PDM

表3 螺杆冲击器性能参数

Table 3 Main technical parameters of the impactor based on PDM

外径/mm	流量/(L·s ⁻¹)	输出转速/(r·min ⁻¹)	压降/MPa	工作扭矩/(N·m)	冲击频率/Hz	冲击功/J	长度/mm
178	25~32	100~144	4.0	7230	5~7	300~450	8570
216	40~55	88~180	4.2	10375	6~12	400~600	9240
286	63~95	110~165	3.6	18010	6~12	600~800	10125

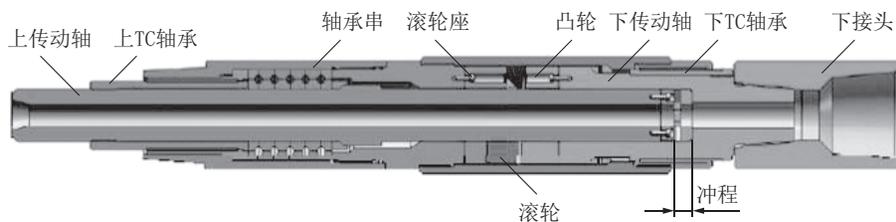


图7 机械式旋冲工具结构示意图

Fig.7 Structure of the mechanical percussive-rotary drilling tool

中国石油大学(华东)研制的弹性蓄能式旋冲螺杆(见图8)外径180 mm,螺杆转速273~428 r/min,冲击频率27~43 Hz,弹簧预紧力2.4 kN,冲锤质量7.8 kg,冲程20 mm,排量24~36 L/s,压耗1.1~1.3 MPa,并且冲击力与弹簧预紧力成正比,冲击频率随排量增大而增大。

旋冲螺杆近年来在新疆、四川、重庆等多个工区的难钻地层进行了推广应用,其中在重庆涪陵焦石坝页岩气田茅口组、栖霞组和韩家店组平均机械钻速较常规螺杆提高20%以上,在四川达州普光工区下沙溪庙组和千佛崖组平均机械钻速较常规螺杆提高40%以上^[24]。

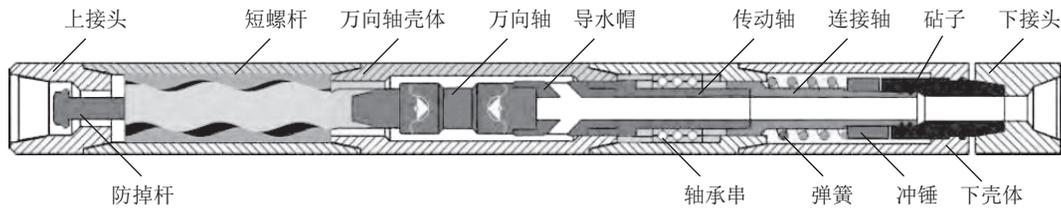


图8 弹性蓄能式旋冲螺杆结构示意图

Fig.8 Structure of the percussive-rotary drilling tool with spring energy accumulation

旋冲螺杆作为近几年新出现的钻井提速工具, 由于融合了常规螺杆大扭矩高转速的输出特性和轴向冲击器高频大冲击功的功能特性, 与其他类型轴向振动冲击工具相比, 对钻井施工条件和地层适应性更好, 应用规模和领域也在逐渐扩大。与此同时, 该工具本身正在朝着提高动密封性能, 降低冲击机构关键零部件磨损等方面不断提升和完善。

2 扭转冲击工具

扭转冲击工具又称扭力冲击器或扭冲工具, 它

利用泥浆驱动内部冲击摆锤做来回的旋转冲击, 将泥浆压力能转换成一定频率、周向扭转、冲击型机械破岩能量传递给PDC钻头。其主要技术特点有: (1)消除粘滑、涡旋、跳钻振动, 减少了反冲扭矩和扭矩振荡; (2)高频扭转冲击能够提高PDC切削齿剪切岩层效率, 提高了机械钻速; (3)延长了钻头寿命、减少了起下钻次数, 缓解了下部钻具组合疲劳损伤; (4)有效地控制井眼轨迹, 提高了井身质量^[25-26]。目前应用较为成熟的扭转冲击器的主要性能参数如表4所示。

表4 扭转冲击工具性能参数

Table 4 Main technical parameters of the torsional impactor

厂 家	工具外径/mm	工具总长/mm	压降/MPa	扭转冲击力/(N·m)	工作排量/(L·s ⁻¹)	冲击频率/Hz
渤海钻探	178	710	1.8~2.4	1000~2000	18~40	16~40
	229	710	2.0~4.5	1000~2000	25~53	16~40
阿特拉	127	710	1.7~2.8	610	11~20	11~22
	165	700	2.2~2.4	1017	18~38	17~40
	219	940	2.4~4.1	1220	25~69	14~30
	279	1140	1.7~2.8	1627	38~76	13~25
成都迪普	121	460	2~5	710~830	12~25	12~27
	190	545	2~5	710~830	18~38	12~27
	203	550	2~5	710~830	28~45	12~27
胜利钻井院	121	460	2.0~2.4	500~1200	12~25	15~40
	172	545	2.0~2.4	500~1200	25~40	15~40
	203	550	2.0~2.4	500~1200	40~55	15~40
	254	565	2.0~2.4	500~1200	55~80	15~40
中石化工程院	186	970	3	960	15~32	15

目前应用较为成熟的扭转冲击器均采用的是基于喷嘴驱动的扭转冲击器(见图9), 压降更小, 流通性更好, 能够通过大颗粒的堵漏材料, 并且扭转冲击力可以通过排量和喷嘴大小进行调节。

与此同时, 中国石油大学(华东)、中石化中原石油工程公司钻井院开展了基于射流元件驱动的扭转冲击器(见图10)^[27]研制, 它通过双稳态射流元

件附壁切换特性, 驱动泥浆左右交替进入摆锤腔室内, 推动摆锤左右摆动冲击, 从而引起钻头扭矩波动。中国石油大学(华东)也提出了一种基于涡轮驱动的扭转冲击器(见图11)^[28], 它主要通过涡轮叶片的旋转来带动扭转冲击机构中的冲击架顺时针和逆时针冲击传动轴, 从而产生扭转冲击力。

在现场应用方面, 阿特拉扭转冲击器在新疆塔

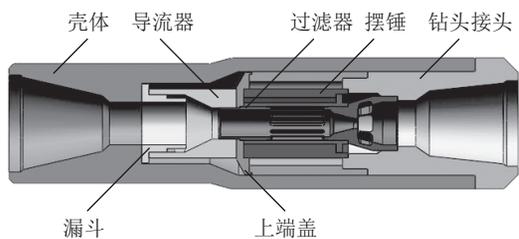


图9 基于喷嘴驱动的扭转冲击器结构示意图

Fig.9 Structure of the nozzle-driven torsional impactor

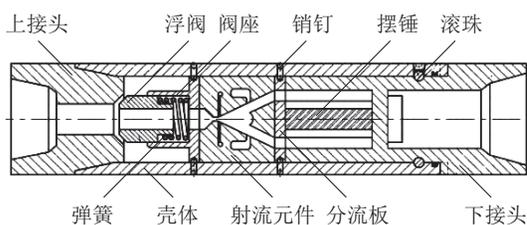


图10 基于射流元件驱动的扭转冲击器结构示意图

Fig.10 Structure of the fluid-jet device driven torsional impactor

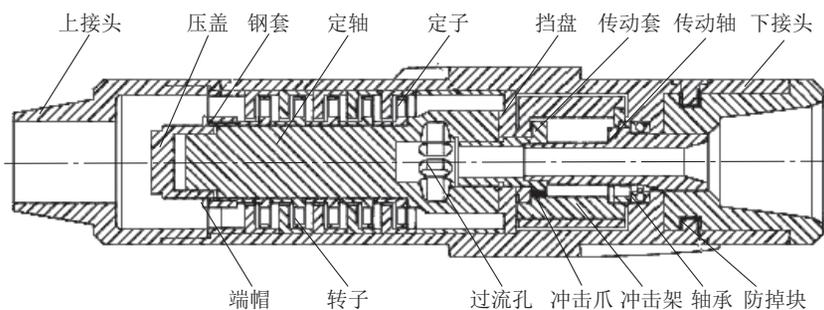


图11 基于涡轮驱动的扭转冲击器结构示意图

Fig. 11 Structure of the turbine-driven torsional impactor

目前,虽然扭转冲击器研发已较为成熟,行业认可度也较高,但国内外各大科研院校和企业仍然在提高冲击能量、延长使用寿命以及提升不同地层适应性等方面开展攻关,目的是让扭转冲击器性能更优,提速效果更好。

3 复合冲击工具

复合冲击工具又称复合冲击器,主要由扭转冲击机构和轴向冲击机构两部分组成,并将高频轴向冲击和扭转冲击传递给钻头,实现“立体破岩”。其主要技术特点如下:

- (1)同时产生高频轴向冲击和往复扭转冲击;
- (2)能够与井下动力钻具配合使用;
- (3)提高钻头破岩能量,减少钻头破岩阻力,提

里木、青海和川东北等地区进行了推广应用,其中在塔里木地区平均机械钻速提高110%以上,在川东北元坝地区平均机械钻速3.46 m/h,较邻井提高44.17%。中石化胜利钻井院的扭转冲击器先后在东海、南海、玉门、辽河等地区累计应用150余井次,累计进尺超40000 m,机械钻速平均提高59%^[29]。中石化石油工程技术研究院研制的扭转冲击器先后在山东、内蒙古、四川等地区应用10余口井,其中在山东临盘油田盘2-斜125井配合液力加压器使用,机械钻速同比提高33%以上^[30]。中石油渤海钻探的扭转冲击器近两年在大港、冀东、苏里格和华北等地区应用26口井,平均机械钻速提高53.6%^[31]。成都迪普DeepDrill扭转冲击器在浙江油田YS108区块应用4口井,平均机械钻速提高20%以上,扭矩波动减小50%以上。

高钻头使用寿命^[32]。

近年来,中国石油大学(北京)、中海油研究总院和深圳新速通等科研院校和企业都在开展复合冲击工具研发。其中,中海油研究总院研制的复合冲击器(见图12)具有相同轴向冲击频率和扭转冲击频率的特点,其中轴向冲击功和冲击频率主要与排量和上喷嘴直径大小有关,扭转冲击频率主要与排量和下喷嘴直径大小有关^[33]。其性能参数见表5所示。

中海油研究总院 $\varnothing 190$ mm复合冲击器在鄂尔多斯盆地致密气区块YH-115-4H井直井段平均机械钻速较邻井提高50%以上,定向段平均机械钻速提高139.2%^[34]。

深圳新速通研制了 $\varnothing 131$ 、186、197和261 mm

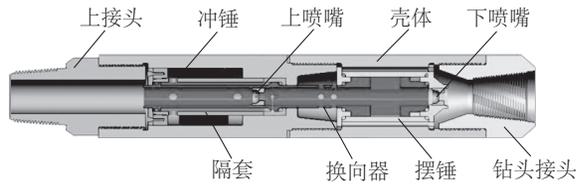


图12 复合冲击器结构示意图

Fig.12 Structure of the compound impactor

表5 复合冲击器性能参数

Table 5 Main technical parameters of the compound impactor

工具外径/mm	适用井眼/mm	扭转冲击力/(N·m)	冲击频率/Hz	流量/(L·s ⁻¹)	压降/MPa	工具长度/mm
190	212.7~238.1	610~780	12~25	23~38	2.0~2.6	950
216	241.3~250.8	610~780	12~25	38~45	2.0~2.6	1100
254	311.2~333.4	610~780	12~25	45~60	2.0~2.6	1100

4 结论

通过列举以上振动冲击提速工具的最新研究进展,可以清楚地看到,振动冲击提速工具通过合理利用并转化泥浆水力能量,有效提高了破岩能量,改善了钻头破岩环境,降低了破岩阻力。根据现场应用情况来看,可以不同程度地提高钻井过程中的机械钻速,缩短钻井周期。

而振动冲击提速工具在未来的发展过程中,需要进一步开展的优化研究分别为:射流式冲击器需要降低压降、提高寿命;射吸式冲击器需要提升稳定性和能量利用率;自激振荡冲击器和脉冲式提速器需要优化内部流场、提升振动冲击能量;旋冲螺杆需要降低关键部件磨损速率、减少内部损耗;扭转冲击器需要提高扭转冲击能量;复合冲击器需要优化轴向冲击与扭转冲击的能量分配。

与此同时,针对上述钻井提速用振动冲击工具尚未得到大面积推广应用的情况,还需要深入开展不同类型振动冲击工具与配套钻头的优选研究,最大限度地发挥工具与钻头的功能特点,进而达到最优的协同提速效果。

参考文献(References):

[1] 汪海阁,葛云华,石林. 深井超深井钻完井技术现状、挑战和“十三五”发展方向[J]. 天然气工业, 2017, 37(4): 1-8.
WANG Haige, GE Yunhua, SHI Lin. Technologies in deep and ultra-deep well drilling: Present status, challenges and future trend in the 13th Five-Year Plan period (2016-2020) [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(4): 1-8.

共4种规格复合冲击工具,并在新疆、四川、海南等地区应用20余口井,平均机械钻速提高30%以上。

目前复合冲击器研制处于起步阶段,轴向冲击与扭转冲击的能量分配、内部流场优化、工具与地层匹配性等方面仍然需要进一步研究。

[2] 张锦宏. 中国石化石油工程技术发展现状及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 9-17.
ZHANG Jinhong. Current status and outlook for the development of Sinopec's petroleum engineering technologies [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 9-17.

[3] 张鑫鑫,彭视明,孙铭泽,等. 基于CFD的高能射流式液动冲击器活塞与缸体密封特性研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(2): 534-541.
ZHANG Xinxin, PENG Jianming, SUN Mingze, et al. Study on the sealing characteristics between the piston and cylinder in the high-energy liquid-jet hammer based on CFD method [J]. Journal of Jinlin University (Earth Science Edition), 2017, 47(2): 534-541.

[4] 张鹏飞,程靖清,葛东,等. 基于LS-DYNA的射流式液动锤回程动力外传机构研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(2): 71-74.
ZHANG Pengfei, CHENG Jingqing, GE Dong, et al. Power external transmission mechanism in return stroke of the jet type fluid hammer based on LS-DYNA [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(2): 71-74.

[5] 索忠伟. 射流式冲击器水平井段试验及失效分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(6): 59-63.
SUO Zhongwei. Fluid hammer field test and failure analysis in horizontal wells [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(6): 59-63.

[6] 索忠伟. Ø228.6mm射流冲击器研制及硬地层提速试验[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(4): 54-58.
SUO Zhongwei. The development of Ø228.6 mm Hydro-effluent hammer and ROP increase test in hard formations [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(4): 54-58.

[7] 王磊,张仁龙,索忠伟,等. 适用于PDC钻头的液动射流冲击器改进及应用[J]. 石油机械, 2018, 46(12): 12-16.
WANG Lei, ZHANG Renlong, SUO Zhongwei, et al. Im-

- provement and application of hydraulic jet impactor adapted to PDC bit[J]. *China Petroleum Machinery*, 2018,46(12):12-16.
- [8] 刘江. 双作用射吸式液动冲击器优化配置研究与应用[D]. 西安:西安石油大学,2019:8-11.
LIU Jiang. Research and application of optimal configuration of double-acting injection suction hydraulic impactor[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019:8-11.
- [9] 蒋宏伟,黄成,王克雄,等.射吸式液动冲击器内部流场数值模拟研究[J].*石油机械*,2007,35(9):25-28.
JIANG Hongwei, HUANG Cheng, WANG Kexiong, et al. Numerical simulation of the flow field in an injection-suction hydraulic impactor[J]. *China Petroleum Machinery*, 2007,35(9):25-28.
- [10] 李玮,高海舰.射吸式冲击器在塔里木地区的现场应用[J].*辽宁石油化工大学学报*,2017,37(6):36-39.
LI Wei, GAO Haijian. On-site application of fire-suction hydraulic impactor in Tarim area[J]. *Journal of Liaoning Shihua University*, 2017,37(6):36-39.
- [11] 李玮,高海舰,顾明勇,等.射吸式冲击器冲击效果离散元分析[J].*中国煤炭地质*,2017,29(7):60-64.
LI Wei, GAO Haijian, GU Mingyong, et al. Percussion effect discrete element analysis for jet vacuum type hydro-percussive tools[J]. *Coal Geology of China*, 2017,29(7):60-64.
- [12] 陈少成.基于液动冲击器的硬地层高效破岩技术研究[D].西安:西安石油大学,2020:43-51.
CHEN Shaocheng. Research on efficient rock breaking technology of hard formation based on hydraulic impactor[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020:43-51.
- [13] 雷鹏,倪红坚,王瑞和,等.自激振荡式旋转冲击钻井工具水力元件性能分析与优化[J].*振动与冲击*,2014,33(19):175-180.
LEI Peng, NI Hongjian, WANG Ruihe, et al. Performance analysis and optimization for hydraulic components of self-oscillating rotary impact drilling tools[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014,33(19):175-180.
- [14] 何超,姚建林,胡畔,等.自激振荡钻具振荡力计算及影响因素分析[J].*钻采工艺*,2016,39(4):5-7.
HE Chao, YAO Jianlin, HU Pan, et al. Oscillation force computation and influential factors analysis of self-excited oscillation drilling tool[J]. *Drilling & Production Technology*, 2016,39(4):5-7.
- [15] 景英华,袁鑫伟,姜磊,等.高速旋转冲击钻井破岩数值模拟及现场实验[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*,2019,43(1):75-80.
JING Yinghua, YUAN Xinwei, JIANG Lei, et al. Numerical simulation and field experimental study on rock breaking in high speed rotating percussion drilling[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2019,43(1):75-80.
- [16] 刘书斌,倪红坚,张恒,等.多维冲击器钻井提速技术及应用[J].*石油机械*,2020,48(10):44-50.
LIU Shubin, NI Hongjian, ZHANG Heng, et al. Multi-dimensional impactor and its application[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020,48(10):44-50.
- [17] 雷鹏,倪红坚,马琳,等.自吸环空流体式自激振荡脉冲粒子射流调制机制分析[J].*中国石油大学学报(自然科学版)*,2014,38(3):80-86.
LEI Pei, NI Hongjian, MA Lin, et al. Mechanism analysis for self-oscillation pulse particle jet based on automatic fluid sucking from annulus[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014,38(3):80-86.
- [18] 崔龙连,汪海阁,张富成,等.频率可调脉冲提速工具深井提速现场试验研究[J].*石油机械*,2013,41(12):34-37.
CUI Longlian, WANG Haige, ZHANG Fucheng, et al. Field test of the adjustable frequency pulse speedup tool for deep well ROP improvement [J]. *China Petroleum Machinery*, 2013,41(12):34-37.
- [19] 樊继强.井底交变流场提速工具的研制及特性测试[J].*石油机械*,2020,48(6):37-42.
FAN Jiqiang. Development and characteristic test of downhole alternating flow field ROP enhancing tool[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020,48(6):37-42.
- [20] 田家林,杨应林,朱志,等.基于旋冲螺杆提速器的井下动力特性[J].*石油学报*,2019,40(2):224-231.
TIAN Jialin, YANG Yinglin, ZHU Zhi, et al. Downhole dynamic characteristics of an actuator based on rotary screw [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019,40(2):224-231.
- [21] 马广军,张海平,王甲昌,等.基于螺杆钻具的旋冲钻井装置设计及试验研究[J].*石油机械*,2016,44(6):24-27.
MA Guangjun, ZHANG Haiping, WANG Jiachang. Designed and testing of the positive displacement motor driven rotary percussion drilling device[J]. *China Petroleum Machinery*, 2016,44(6):24-27.
- [22] 陈勇,吴仲华,聂云飞,等.应用于螺杆钻具的轴向振动冲击装置研制[J].*石油钻采工艺*,2017,39(2):212-217.
CHEN Yong, WU Zhonghua, NIE Yunfei, et al. Development of axial vibration impact device used for screw drill [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017,39(2):212-217.
- [23] 玄令超,管志川,张会增,等.弹簧蓄能激发式旋转冲击钻井装置的研制[J].*石油机械*,2015,43(11):18-21.
XUAN Lingchao, GUAN Zhichuan, ZHANG Huizeng, et al. Percussive-rotary drilling tool with spring accumulating collision [J]. *China Petroleum Machinery*, 2015,43(11):18-21.
- [24] 张昕,伊明,乔东宇,等.机械式旋转冲击钻井提速工具应用研究[J].*新疆石油天然气*,2019,15(4):79-82.
ZHANG Xin, YI Ming, QIAO Dongyu, et al. Application research of mechanical rotary percussion drilling tool[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2019,15(4):79-82.
- [25] 李小洋,李宽,张永勤,等.新型涡轮扭力冲击器的试验研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2019,46(12):40-43.
LI Xiaoyang, LI Kuan, ZHANG Yongqin, et al. Experiment

- on a new turbine torsional impactor[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(12): 40-43.
- [26] 贾红军,王攀,冯伟雄,等.深井硬岩地层钻井高频低幅扭转振荡耦合冲击器研制与应用[J].*特种油气藏*,2018,25(4): 158-162.
JIA Hongjun, WANG Pan, FENG Weixiong, et al. Development and application of high-frequency low-torque impactor with torsion-oscillation coupling for drilling of deep and hard formations[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2018, 25(4): 158-162.
- [27] 玄令超,管志川,刘永旺,等.射流式扭转冲击钻井工具: ZL201310726252.8[P].2013-12-25.
XUAN Lingchao, GUAN Zhichuan, LIU Yongwang, et al. A torsional impact drilling tool based on liquid-jet hammer: ZL201310726252.8[P]. 2013-12-25.
- [28] 宋洵成,李同同,管志川,等.一种涡轮扭转冲击发生器: ZL201320838873.0[P].2013-12-18.
SONG Xuncheng, LI Tongtong, GUAN Zhichuan, et al. A Torsional impact generator based on turbine blade: ZL201320838873.0[P]. 2013-12-18.
- [29] 罗燕,刘衍聪,周燕,等.SL系列扭冲工具应用效果研究[J].*内蒙古石油化工*,2017,(5):17-19.
LUO Yan, LIU Yancong, ZHOU Yan, et al. Research on the application effect of SL series torsional impactor [J]. *Neimenggu Petrochemical Industry*, 2017, (5): 17-19.
- [30] 罗恒荣,崔晓杰,谭勇,等.液力扭转冲击器配合液力加压器的钻井提速技术与现场试验[J].*石油钻探技术*,2020,48(3):58-62.
LUO Hengyong, CUI Xiaojie, TAN Yong, et al. Research and field test on drilling acceleration technology with hydraulic torsional impactor combined with hydraulic boosters[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(3): 58-62.
- [31] 陈新勇,张苏,付潇,等.扭力冲击钻井工具模拟分析及现场试验[J].*石油机械*,2018,46(9):29-32.
CHEN Xinyong, ZHANG Su, FU Xiao, et al. Simulation analysis and field test of torque impact drilling tool[J]. *China Petroleum Machinery*, 2018, 46(9): 29-32.
- [32] 查春青,柳贡慧,李军,等.复合谐振钻井工具的研制及现场试验[J].*石油机械*,2019,47(5):66-70.
ZHA Chunqing, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Development and field application of the compound vibration drilling tool[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(5): 66-70.
- [33] 张林强,赵俊,王鹏,等.三维振动冲击器钻井提速工具研制与现场试验[J].*石油机械*,2017,45(5):61-65.
ZHANG Linqiang, ZHAO Jun, WANG Peng, et al. Development and field test of 3D vibration impactor[J]. *China Petroleum Machinery*, 2017, 45(5): 61-65.
- [34] 苏建,袁则名,和鹏飞,等.HPG复合冲击钻井提速工具在渤海油田的应用[J].*海洋工程装备与技术*,2019,6(1):457-464.
SU Jian, YUAN Zeming, HE Pengfei, et al. Application of HPG composite impactor speed up tool in Bohai Oilfield[J]. *Ocean Engineering Equipment and Technology*, 2019, 6(1): 457-464.

(编辑 韩丽丽)