

Ø127型水力振荡减摩装置的研制及特性分析

张毅¹, 张润畦²

(1. 中国石化集团国际石油工程有限公司, 北京 100020; 2. 华北科技学院, 北京 101601)

摘要: 针对水平井、定向井等钻井过程中摩阻大、托压等问题, 研制了Ø127型水力振荡减摩装置, 可减小管柱与井壁或套管壁之间的摩擦力, 有效改善钻压传递, 延伸大位移井、长水平井等井眼长度, 提高机械钻速。首先分析了水力振荡减摩钻井技术机理, 对水力振荡减摩装置的主要部件进行了技术分析, 介绍了该装置的工作原理。通过数值模拟、室内试验和现场试验相结合的方法, 验证了减摩装置设计的可行性和振动的稳定性。研究表明, 该装置性能可靠, 其脉动压力频率和幅值、轴向振动位移均随排量的增大而增大。研究成果可为钻井减摩降阻、提高机械钻速等相关技术与工具研究提供参考。

关键词: 水平井; 大位移井; 水力振荡减摩装置; 轴向振动

中图分类号: P634; TE24 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)01-0084-10

Development and characteristic analysis of Ø127 hydraulic oscillation friction reduction tool

ZHANG Yi¹, ZHANG Runqi²

(1. Sinopec International Petroleum Service Corporation, Beijing 100020, China;

2. North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China)

Abstract: With regard to the challenges of high friction, drag force, etc. during drilling directional and horizontal wells, Ø127 hydraulic oscillation friction reduction tool was developed, which is able to effectively reduce the friction force between the drill string and the wellbore or inner wall of casing, improve weight on bit transfer, extend the length of directional and horizontal sections, and increase the rate of penetration. The mechanism of hydraulic oscillation antifriction drilling technology is introduced. The main parts of the tool are analyzed, and the operating principle is studied. The feasibility and the vibration stability of the tool were verified by numerical simulation, laboratory test and field test. The results showed that the performance of the device was reliable, and the hydraulic pulse frequency, pressure fluctuation amplitude and axial vibration displacement increased with flow rates. The results can provide references for research and development of related drilling tools and technologies for friction reduction, ROP improvement, etc.

Key words: horizontal well; extended reach well; hydraulic oscillation friction reduction tool; axial vibration

0 引言

赋存较好的浅层油气资源目前正在日益枯竭, 钻井技术正在向低开采成本、高采收率方向发展。与直井相比, 大位移井和水平井的泄油面积更大, 并且能够实现在一些特殊工况的井型和油层中的

钻进, 显著提高油气采收率, 其在油气开采中的应用也越来越广泛^[1]。但“托压”现象在钻大位移井和水平井(尤其是长水平段)时经常发生, 这是因为井壁与管柱之间的摩阻会随着二者间接触面积的增大而越来越大, 这时施加的钻压很难有效地传递至

收稿日期: 2022-06-22; 修回日期: 2022-09-11 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.01.013

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目“海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究”(编号: U19B6003)

第一作者: 张毅, 男, 汉族, 1989年生, 工程师, 油气井工程专业, 硕士, 从事国际石油工程项目市场开发和工程管理工作, 北京市朝阳区吉市口路9号, zhy_eason@126.com。

引用格式: 张毅, 张润畦. Ø127型水力振荡减摩装置的研制及特性分析[J]. 钻探工程, 2023, 50(1): 84-93.

ZHANG Yi, ZHANG Runqi. Development and characteristic analysis of Ø127 hydraulic oscillation friction reduction tool[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 84-93.

钻头,使得大位移井、水平井等井眼的延伸能力受到较大限制。同时,高摩阻还会造成井眼弯曲,降低钻机钻达最大深度的能力,严重时还会影响油井产量^[2]。而当钻压增加至一定值时还可能发生突然憋泵,极易诱发钻具卡钻等井下故障与复杂,从而影响高效安全钻进。

目前钻井行业通常使用的减摩降阻手段包括:井眼轨迹优化,钻井液性能优化,井眼清洁能力改善,以及专门减摩装置的使用^[3-7]。通过设计易于钻进的井眼轨迹,同时加大井眼清洁力度,能够实现管柱摩阻的降低。使用润滑性和流变性较好的钻井泥浆,可以减少粘附卡钻的发生。而在遇到管柱摩阻较大的情况时,可以通过使用专门的减摩降阻井下工具来显著降低管柱摩阻。

研究表明^[8-12],将轴向振动工具利用在大位移井以及水平井钻进中,能够有效降低管柱摩阻。在钻机载荷、井身结构、水力参数等维持相对不变的情况下,显著提高机械钻速,大大延伸井眼长度。近年来,轴向振动工具研发与设计以Fluid Hammer提速工具、轴向振荡减阻器、自激振荡式提速工具、轴扭复合冲击提速工具等为代表,有力改善了钻进效率。

(1) Fluid Hammer 提速工具由美国 NOV 公司成功研发,主要由螺杆马达总成和振动冲击短节 2 部分组成。工具入井工作时,钻井泥浆驱动上部螺杆转子产生高速旋转,螺杆转子带动花键心轴及下接头一起高速旋转,给钻头提供破岩扭矩;花键心轴带动下接头旋转时,下凸轮与上凸轮产生交变啮合,在钻压作用下产生交变冲击力,并直接施加给钻头,为钻头提供破岩冲击力。该工具的技术优势为,施加给钻头的冲击力是通过钻压作用而来,具有较高的冲击载荷并直接施加给钻头;工具设计有螺杆短节部分,故而在提高钻速的同时又利于控制井斜。目前 Fluid Hammer 已应用于多个油田^[13-14],从现场应用效果看,该工具在大尺寸井眼的提速效果更加明显,但在小尺寸井眼中的提速效果欠佳;其下部冲击短节机械结构设计复杂,成本较高;密封腔通过旋转变密封来实现密封,井下使用寿命较低。

(2) 轴向振荡减阻器又被称为轴向水力振荡发生器(Axial-oscillation Generator Tool, Agitator),是由美国 NOV 公司研发生产的轴向振动减摩降扭工具^[15-16]。该工具由振动短节和动力短节 2 部分构成。动力短节为螺杆钻具结构,在转子下方设计有

脉冲动力阀(由转子阀与定子阀构成)。钻进时钻井泥浆流经螺杆,驱动螺杆带动转子运动,转子运动能够带动阀盘转动,周期性地改变过流通道面积,从而使作用在活塞上的水力压力发生周期性变化。在脉动压力峰值时,活塞压缩碟簧,而当脉动压力处于波谷时,碟簧释放能量推动活塞复位,活塞在脉动压力和碟簧弹性作用下做往复运动,从而起到振动减摩降扭的效果。该工具的技术优势为,能够改善井下钻压传递效果,特别是在定向钻进或滑动钻进时应用效果明显,降低了滑动钻进时粘附卡钻、托压的可能性;与 PDC 钻头或牙轮钻头配合施工,可提高钻头的定向能力和钻头滑动钻进能力,有效提高机械效率;与 MWD/LWD 兼容,不会损坏 MWD/LWD 工具或干扰信号传递。该工具已在全球范围内的数千口井中施工应用,受到了业内人士的广泛认可。然而,随着钻井难度的不断加大,复杂地层、海洋钻井、深井超深井施工中遇到的高温高压、油基泥浆等对轴向振荡减阻器提出了更高要求。为此,国内已经开展了金属螺杆及涡轮驱动式水力振荡器的研究工作^[17],目前尚处于试验阶段。

(3) 自激振荡式提速工具是将机械冲击和水力脉冲作用相结合^[18-21],工具安装于钻头与钻铤之间。钻进时钻井泥浆经一级振荡器和二级振荡器后,通过八方连接杆经下接头后流入钻头。工具内部的振动冲击锤将产生一级振荡及二级振荡作用,振荡作用产生的冲击力通过八方杆直接作用于钻头,从而提高钻头的破岩效率;同时,钻井泥浆通过八方杆流经钻头后,经钻头水眼喷出,结合冲击锤上下高频往复冲击,形成水力脉冲作用并直接作用于井底岩石,提高破岩能力,同时能够改善井底流场,强化清洗效果。该工具有效结合了水力脉冲和振动冲击的技术优势,提高了钻头破岩效率;采用水力脉冲诱发机械振动,结构简单,性能可靠。目前,该工具已在国内进行了现场推广应用^[22-24]。但是,由于该工具的振动冲击力是通过钻井泥浆的脉冲作用产生的,因此在岩石强度较高、可钻性较差的地层中钻进时,无法有效产生轴向振动,应用受限;受地层砂、泥浆固含量等因素影响,振荡冲击腔室流体运行轨迹复杂,冲击锤体易受冲蚀。

(4) 轴扭复合冲击提速工具能够发挥轴向和扭向冲击作用,提高提速工具的适用范围,近年来受到了业内学者的广泛关注^[25-29]。该工具工作原理为:

钻井泥浆流经节流喷嘴产生压降,在该压降作用下,轴向冲锤与周向摆锤部位产生高低压腔,从而驱使冲击锤由高压腔向低压腔产生振动冲击;在换向器的调节下,轴向冲锤和周向摆锤均产生连续的高低压腔室互换,从而产生连续的轴向与周向振动冲击作用,在此2种力的共同作用下提高钻头破岩效率,达到提速目的。该工具的技术优势为,由于可产生连续的轴向与周向冲击作用,能够有效提高钻头的破岩效率,发挥轴向冲击与周向冲击提速效果。然而,由于复合冲击力的实现是通过节流压降和冲击腔室的高低压转换而来,因此对钻井泥浆固相含量、含砂量等要求较高;整体动密封大都通过金属密封实现,易受泥浆冲蚀。

总结以上工具的研制进展及存在问题,笔者开展了水力振荡减摩装置的研制及其特性研究,对延伸大位移井和水平井井眼长度具有重要的实际意义。

1 水力振荡减摩钻井技术机理

使用螺杆进行定向钻进时,转盘或顶驱会停止转动,以通过钻头和弯外壳螺杆来实现造斜,即“滑动”作业。滑动作业的难点在于,通常情况下静摩擦力会远远大于动摩擦力,而处于静止状态的钻杆需要克服的摩擦阻力正是从动摩擦转换成了静摩擦,这便不利于工具面的保持和继续钻进。这可以运用基本物理学原理解释。

假设将一重力为 W 的滑块放置在平面上,由牛顿第三定律可知,平面对滑块产生一个作用力 N ,该力与滑块的重力方向相反、大小相等,此刻滑块处在平衡状态。为了使滑块运动,施加在其一侧的作用力 P 必须大于平面与滑块之间的摩擦力 F 。该静止状态时的摩擦力是静摩擦力,其计算公式为:

$$F_{\text{静}} = \mu_{\text{静}} N \quad (1)$$

式中: $\mu_{\text{静}}$ ——滑块与平面之间存在的静摩擦系数。

假设滑块要克服静摩擦力开始移动,二者之间的摩擦力减小。这个减小了的摩擦力就是动摩擦力,其由以下公式定义:

$$F_{\text{动}} = \mu_{\text{动}} N \quad (2)$$

式中: $\mu_{\text{动}}$ ——在滑块运动时滑块与平面间存在的动摩擦系数。

动摩擦力与静摩擦力间的关系与二者接触部分

有关,但通常动摩擦力大约是静摩擦力的 75%^[30]。因此,动摩擦力的公式可以转换成:

$$F_{\text{动}} = 0.75\mu_{\text{静}} N \quad (3)$$

可以看出,当施加在其一侧的作用力 $P=0$ 时,与之方向相反、大小相等的静摩擦力 $F_{\text{静}}$ 也等于 0。但随着 P 增大, $F_{\text{静}}$ 也线性增大,直至 $P > F_{\text{静}}$ 的极限值。在该转换点摩擦力减少了 25%,并随着滑块的移动而保持恒定,说明使滑块保持运动要比使滑块从静止状态开始运动更加容易。这个基本原理不仅适用于定向钻井,在钻造斜段、稳斜段甚至垂直段时也能够参照该原理。

值得注意的是,静摩擦力过大,还会带来定向钻进中的诸多挑战,包括重力叠加可导致钻柱屈曲、钻具粘滑、工具面失效以及钻速异常或下降等。而通过向装配轴向振动装置的减摩工具中泵入钻井流体,诱发钻柱产生轴向振动,该振动能够减小井壁与管柱之间的有效摩擦系数。在该理论的发展中,3种形式的振动——横向、扭向以及轴向,都被研究讨论过^[31-33]。最终,轴向振动被证明是最合适的,原因主要在于轴向振动的减摩降阻效果最佳,并且其更易于通过可控的方式来诱发^[34]。

在复杂的钻井状况下,叠加原理可以进一步阐释,运动的叠加与两种类型摩擦阻力的转化能够降低管柱摩擦。为方便起见,假设振动是正弦变化的,下面描述水力振荡减摩机理,瞬时速度 v 可表示为:

$$v = v_i + v_v \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (4)$$

式中: v_v ——钻柱振动速度的最大值; v_i ——钻柱恒定的下行速度; T ——振动周期; t ——时间。

考虑到在一定范围内,库伦摩擦不受物体移动速度变化的影响,并且与物体运动方向相反,时间平均有效摩擦力可表示为:

$$F_{\text{有效}} = \frac{T_f - T_r}{T_f + T_r} F_0 \quad (5)$$

式中: F_0 ——无振动条件下的摩擦力; T_r 、 T_f ——分别代表后退周期和前进周期。

从该简化的模型可以得出:如果钻柱下行速度减小或者运动速度幅值增大,则会增强减摩效果;如果钻柱的速度方向在部分振动周期内反转,则会减少有效摩擦力。

综上所述,钻具轴向振动可以使滑动钻进时的静摩擦因数减小到动摩擦因数的大小,显著减小井

壁与管柱之间的摩擦阻力。而且当轴向振动产生时,如果钻柱的叠加运动速度方向发生变化,那么摩擦力的方向也会改变,从而减少井壁与管柱间的总摩擦力。水力振荡减摩钻井技术在各种钻进模式中均适用,能够大幅提高钻井效率,大大减少与托压、钻具粘滑、钻杆屈曲、工具面控制和机械钻速降低等井下故障和复杂。

2 水力振荡减摩装置研制

2.1 装置结构

$\text{O}127$ 型水力振荡减摩装置由本体、水力脉冲射流发生装置和轴向振动装置组成如图 1 所示。本体由下筒和上筒组成。轴向振动装置由活塞部、承压板、碟簧部、中心管组成。活塞部由活塞套、油封、活塞组成。碟簧部由碟簧组、碟簧上压套、碟簧调节套、碟簧护套和碟簧座组成。水力脉冲射流发生装置由导流体、叶轮、叶轮轴、叶轮座、振荡喷嘴等

组成。

2.2 工作原理

图 2 表示了 $\text{O}127$ 型水力振荡减摩装置的工作原理。装置工作时,在导流体处泥浆的流动方向发生改变,钻井液高速冲击叶轮,驱动叶轮旋转。叶片周期性改变流道面积,扰动来流诱发脉冲压力。脉冲压力经过振荡喷嘴的调制放大,施加在承压板及活塞受力面上。如图 2(a) 所示,当钻井液压力升高时,流体推动活塞和中心管运动,中心管推动碟簧上压套压缩碟簧组,中心管带动传动管伸出,碟簧组聚集能量。如图 2(b) 所示,当钻井液压力降低时,承压板及活塞受力面受到的作用力减小,碟簧组释放能量,带动碟簧上压套、中心管及活塞收缩。综上,轴向振动装置的动力由水力脉冲射流发生装置提供,减摩装置的中心管及传动管能够实现往复运动,给钻具或钻头提供轴向振动的能量,改善钻压传递,延伸井眼长度,有效提高钻进效率。

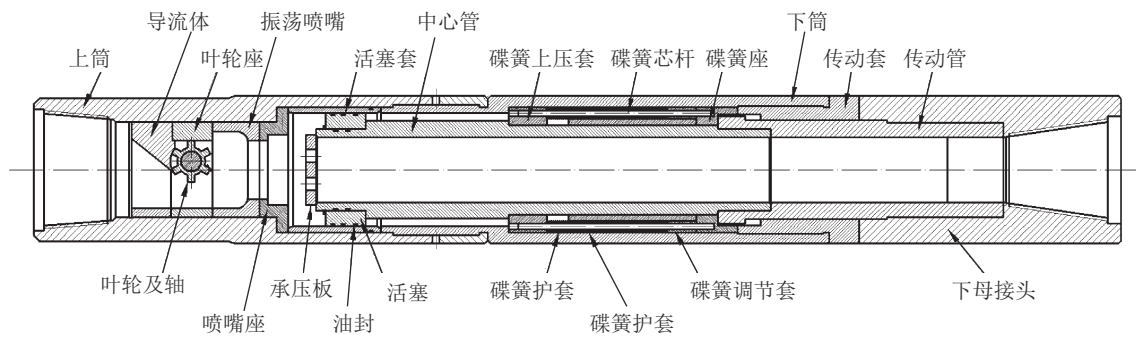


图 1 $\text{O}127$ 型水力振荡减摩装置结构

Fig.1 Structure of the $\text{O}127$ hydraulic oscillation friction reduction tool

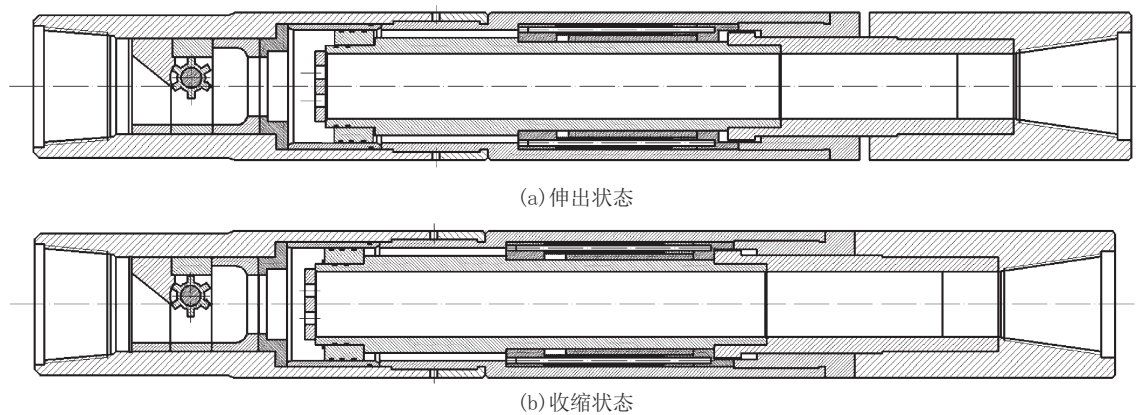


图 2 水力振荡减摩装置工作原理

Fig.2 Operating principle of the hydraulic oscillation friction reduction tool

3 水力振荡减摩装置流场数值模拟

3.1 模型建立

Ø127型水力脉冲射流发生装置通过叶轮转动,将连续流体流动调制为脉冲射流。为开展水力振荡减摩装置内水力脉冲压力波动特性数值研究,可通过转动模型中的滑移网格模型求解。装置的流场区域从上母接头入口开始,经导流体、叶轮、自激振荡腔室及喷嘴、承压板通孔、中心管等,最终到中心管出口处。由于水力振荡减摩装置的结构近似为平面对称结构,故采用二维数值模拟方案。钻井液从左端上母接头进入,先后经导流体、叶轮、自激振荡腔室及喷嘴、承压板通孔和中心管等部件,从中心管末端流出。对计算域利用Gambit软件运用结构化网格模型划分。另外,为了优化计算精度,在叶轮叶片的转动部分又施加了局部网格加密^[35]。所建的水力振荡减摩装置物理模型如图3所示。

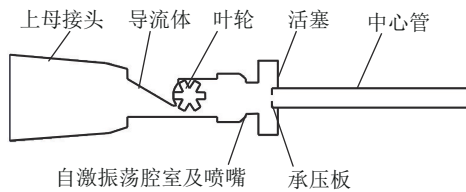


图3 水力振荡减摩装置物理模型

Fig.3 Physical model of the hydraulic oscillation friction reduction tool

边界条件:入口条件是速度(排量)入口边界,出口条件是出口流动边界。叶轮表面采用速度无滑移条件,旋转速度和叶轮轴转速相同,叶轮表面为旋转壁面,其余外壁为固定壁面^[36]。

3.2 数值模拟方案

针对影响水力振荡减摩装置工作性能的水力脉冲波动特性进行数值模拟,制定了Ø127型装置的数值模拟参数组合。改变流体排量和叶轮叶片数目可以调节水力脉冲压力脉动频率和幅值,进而改变活塞及承压板受力情况,调节装置轴向振动的位移大小。各个叶片数目的模拟方案见表1。

表1 不同排量和叶片数影响规律的参数组合

Table 1 Parameter combination of different flow rates and blades numbers

叶片数	排量/(L·s ⁻¹)
3,4,6	6,7,8,9,10

3.3 模拟结果分析

3.3.1 压力场分布

运用Fluent计算流体力学软件,分别模拟了不同叶轮叶片数Ø127型装置在不同排量下的流场。可以看出,随着叶轮的旋转,在振荡喷嘴出口端出现的低压区不断变化,从积累到逐渐消失,然后又逐渐积累,即叶轮在旋转过程中,会对入口来流产生周期性扰动,进而引发压力脉动。该压力作用在下筒活塞及承压板上,对碟簧组及中心管可施加周期性作用力,驱动装置产生轴向振动。

以10 L/s排量,6片叶轮减摩装置为例。设定排量为10 L/s,通过可视化装置测定6叶片叶轮转速为82 r/min,监测装置内部流场稳定后在叶轮转动1圈时间内的压力变化规律。装置内部流体压力场分布云图如图4所示。可以看出,6个叶片周期性对来流施加扰动,叶轮每旋转1/6圈为一个波动周期。出口的压力脉动频率与叶轮转速相关,叶轮每转动1圈,出口压力波动发生6个周期性变化。通过模拟其他叶片数和排量下的流场,发现情况类似,即n个叶片每旋转1/n圈为一个波动周期,叶轮每转动1圈,出口压力波动发生n个周期性变化。

水力脉冲压力脉动幅值是指周期性脉动压力的最大值与最小值之差。监测装置入口和出口总压力随时间变化的规律,可以得到装置入口脉动压力幅值为1.43 MPa(如图5所示),出口脉动压力幅值为0.78 MPa(如图6所示)。

3.3.2 排量和叶轮叶片数对水力脉冲压力波动特性的影响规律

改变流体排量和叶轮叶片数,可以得到不同叶片数的Ø127型减摩装置入口和出口处脉动压力幅值随排量变化的关系,如图7、图8所示。通过数据拟合可以看出,不同叶片数减摩装置的入口脉动压力幅值、出口脉动压力幅值均随排量的增大而线性增大。保持排量不变,增加叶轮的叶片数,减摩装置入口及出口处的脉动压力幅值变小,脉动压力幅值随排量线性变化的程度趋缓。这是由于随着入口排量的加大,入口压力也会增大,并且因为来流流速的增加,叶轮的摩擦阻力增大,从而减摩装置的摩阻增大,但装置摩阻及压降的增幅明显小于装置入口压力的增幅,因此随着入口排量的增大,出口压力幅值也增大了。

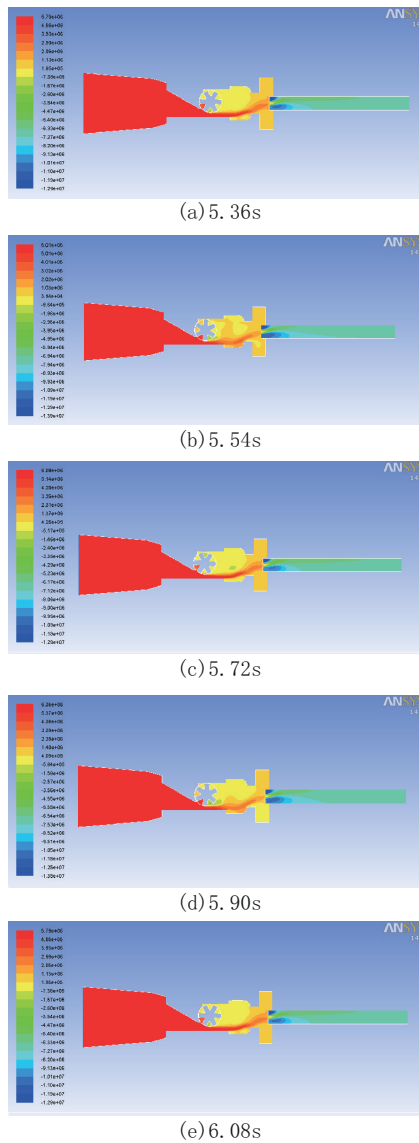


图 4 不同时刻装置内部流体压力场分布云图
Fig.4 Contours of total pressure in the tool at different moments

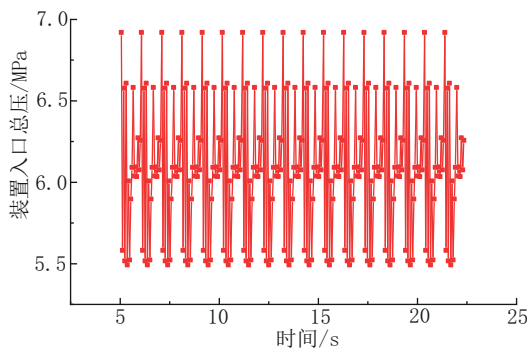


图 5 装置入口总压随时间变化的规律
Fig.5 Total pressure at the tool inlet vs time

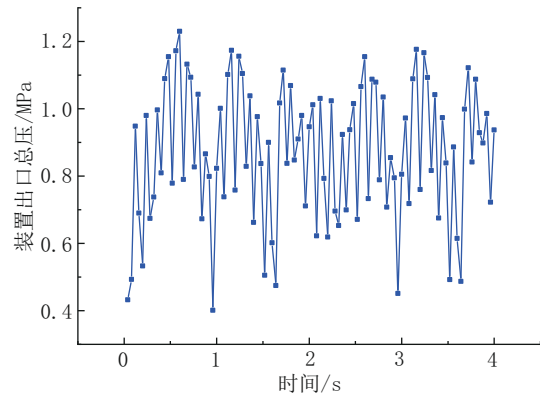


图 6 装置出口总压随时间变化的规律

Fig.6 Total pressure at the tool outlet vs time

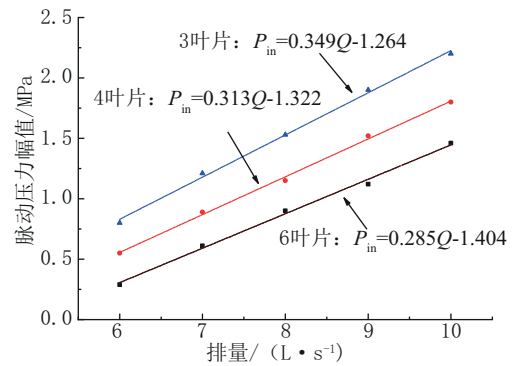


图 7 不同叶片数叶轮装置入口脉动压力幅值随排量变化的规律

Fig.7 Effect of the blade number on the pressure fluctuation amplitude at the inlet at different flow rates

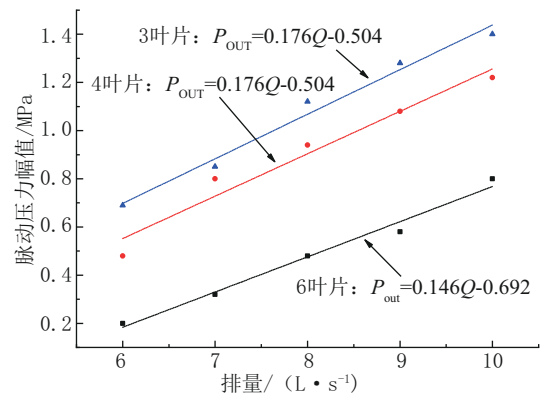


图 8 不同叶片数叶轮装置出口脉动压力幅值随排量变化的规律

Fig.8 Effect of the blade number on the pressure fluctuation amplitude at the outlet at different flow rates

4 室内试验

为测试水力振荡减摩装置的工作状态、水力脉冲特性和振动性能,设计了试验方案,如图 9 所示。

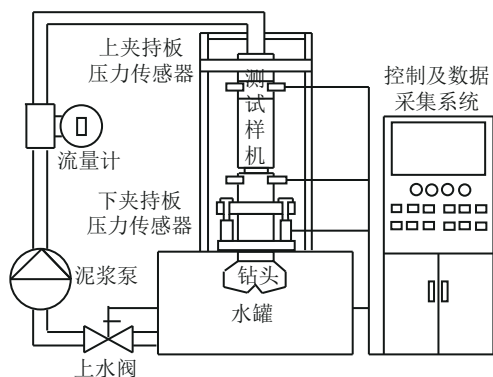


图9 室内实验装置连接示意

Fig.9 Lab test device

首先加工 $\text{O}127$ 型减摩装置各个零配件并进行装配,装置选用6叶片数的叶轮。组装好的水力振荡减摩装置两端分别与泥浆泵的进、回水管线连接,将一组压力传感器安装于水力脉冲射流发生部分的入口端,用于检测流体在进入减摩装置之前的压力情况。将另一组压力传感器安装于轴向振动部分的出口端,用于测量流体在装置出口处的压力变化。在轴向振动部分安装位移传感器,用于实时测量由水力脉冲压力诱发的轴向振动位移。

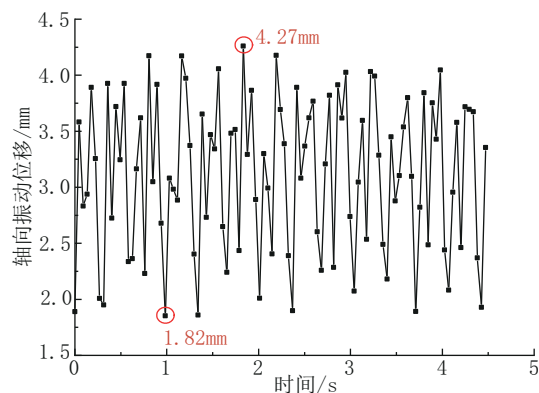
在不同流量条件下,测量了减摩装置的压力脉动频率及幅值、轴向振动位移等性能参数,如表2所示。可以看出,随着排量的增大,脉动频率和幅值、轴向振动位移均逐渐增大,且经过长时间循环试验,减摩装置工作性能稳定。轴向振动部分内中心管及传动管在上游周期性脉动压力的作用下,能够产生持续、稳定、低振幅的振动。

表2 $\text{O}127$ 型减摩装置的主要工作参数Table 2 Operating parameters of $\text{O}127$ type hydraulic oscillation friction reduction tool

排量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	入口压力振 幅/ MPa	出口压力 振幅/ MPa	脉动频 率/ Hz	最大轴向振 动位移/ mm
6	0.260	0.144	5.4	0.48
7	0.591	0.146	6.1	1.02
8	1.029	0.472	6.2	1.79
9	1.201	0.520	7.1	3.01
10	1.308	0.695	8.2	4.27

排量 10 L/s 时,减摩装置轴向振动位移随时间变化的曲线如图10所示。可以看出,轴向振动部分内中心管及传动管在上游周期性脉动压力的作用下

做往复运动,最大轴向振动位移是 4.27 mm ,最小是 1.82 mm 。

图10 排量为 10 L/s 时,轴向振动位移随时间变化的规律Fig.10 Axial vibration displacement vs time at flow rate of 10 L/s

5 现场试验

水力振荡减摩装置在ZKX井进行现场试验,试验地层为含砾砂岩。钻具组合为: $\text{O}215.9 \text{ mm}$ 钻头+ $\text{O}127$ 型水力振荡减摩装置+ $\text{O}165 \text{ mm}$ 无磁钻铤 $\times 25$ 根+ $\text{O}127 \text{ mm}$ 加重钻杆 $\times 15$ 根+ $\text{O}127 \text{ mm}$ 钻杆。试验井段为 $2506\sim 2529 \text{ m}$ (二开),纯钻时间 24.7 h ,进尺 22 m ,排量约 30 L/s ,所钻井段的施工参数如表3所示。

表3 水力振荡减摩装置现场试验施工参数

Table 3 Field test parameters of the hydraulic oscillation friction reduction tool

钻压/ kN	转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	排量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	泵压/ MPa	钻井液密 度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	钻井液 粘度/ s
56~62	35~42	29~30	11	1.11~1.14	41~62

图11~13分别对比了上部井段与试验井段的钻进扭矩、转速、机械钻速。可以看出,在现场施工参数基本不变的情况下,下入水力振荡减摩装置工作性能稳定;维持转速基本恒定,下入装置后,钻进扭矩显著减小,波动范围 $2.9\sim 7.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$,与上部井段相比,钻进扭矩降低了 39.1% ;下入减摩装置后,机械钻速达到 $0.81\sim 1.62 \text{ m/h}$,与上部井段相比提高了 20.2% 。这是因为水力脉冲压力与碟簧组相互作用,驱动井下管柱产生轴向振动,有效改善摩擦条件,有利于钻压传递,显著提高了钻进效率。

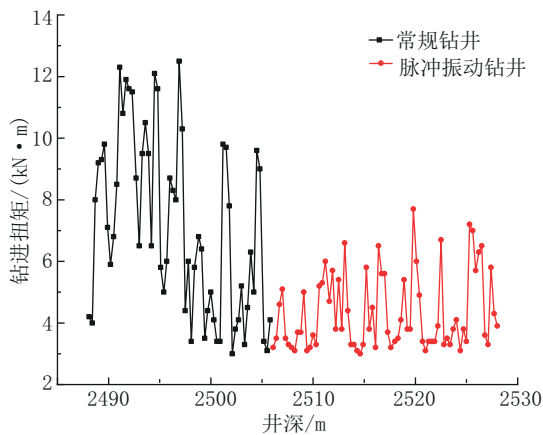


图11 钻进扭矩对比

Fig.11 Drilling torque comparison

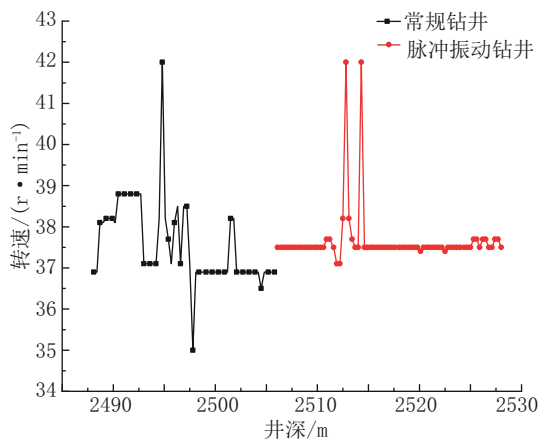


图12 转速对比

Fig.12 Rotary speed comparison

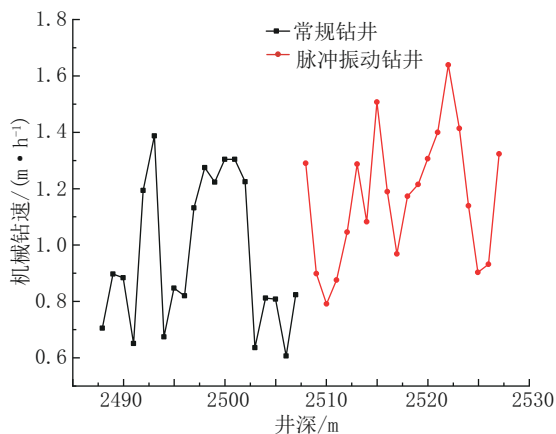


图13 机械钻速对比

Fig.13 ROP comparison

6 结论

(1) 钻井过程中使用轴向振动工具是降低管柱

摩阻、提高钻井速度的重要手段。随着我国油气产业增产保供的压力日益增大,对钻井提速技术提出了更高要求。因此,加大水力振荡诱发轴向振动减摩钻井技术的研究力度,对我国高效开发油气资源具有实际意义。

(2) 结合水力脉冲技术和轴向振动减摩技术,研制了 $\Phi 127$ 型水力振荡减摩装置。该装置可用于直井、定向井、水平井和大位移井,在水力脉冲压力和碟簧的共同作用下实现管柱轴向振动,减小管柱与井壁或套管壁间的有效摩擦系数,显著减小钻进扭矩,提高机械钻速。

(3) 数值模拟分析表明,水力振荡减摩装置压力脉动频率和幅值随排量的增加而变大;叶轮的叶片数增加,装置的脉动压力幅值降低。室内试验和现场试验表明,在长时间循环试验中,减摩装置工作正常,能够产生低振幅振动;压力脉动频率和振幅、轴向振动位移均随排量的增大而增大。

(4) 研究结果验证了水力振荡减摩装置设计的可行性和振动的稳定性,可为水力脉冲振荡减摩技术研究和相关装置参数优化提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 付加胜,李根生,史怀忠,等.井下振动减摩技术研究进展[J].石油机械,2012,40(10):6-10.
FU Jiasheng, LI Gensheng, SHI Huaizhong, et al. Research progress of the downhole vibration antifriction technology [J]. China Petroleum Machinery, 2012,40(10):6-10.
- [2] 李博.水力振荡器的研制与现场试验[J].石油钻探技术,2014,42(1):3-8.
LI Bo. Development and pilot test of hydro-oscillator[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,42(1):3-8.
- [3] Sola, Kjell Inge, Bjørnar Lund. New downhole tool for coiled tubing extended reach[C]//Paper Presented at the SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston, Texas, 2000. doi: <https://doi.org/10.2118/60701-MS>.
- [4] Ford Robert, Stone Andy, Spedale Angelo, et al. Efficiently developing fayetteville shale gas reserves: Percussion drilling solves application challenges/reduces drilling costs[C]//Paper Presented at the SPE Eastern Regional Meeting, Columbus, Ohio, USA, August 2011. doi: <https://doi.org/10.2118/148828-MS>.
- [5] Alali A, Akubue V A, Barton S P, et al. Agitation tools enables significant reduction in mechanical specific energy [J]. Arkhiv Anatomii Gistologii I Embriologii, 2012,37:3-13.
- [6] Bybee, Karen. New downhole tool extends coiled-tubing reach [J]. Journal of Petroleum Technology, 2000,52(6):32-34.

- [7] Homepage of Weatherford International [EB/OL]. [2008-08-16]. <http://www.weatherford.com/Products/Drilling/Drilling-ToolsRentals/Torque and Drag Reduction/>.
- [8] 张毅. 大位移井减阻工具性能试验与数值模拟[J]. 石油矿场机械, 2022, 51(5):13-21.
ZHANG Yi. Performance test and numerical simulation of drag reduction tool for extended reach wells[J]. Oil Field Equipment, 2022, 51(5):13-21.
- [9] Al-BUALI M, DASHASH A, Al-SHAWLY A, et al. Maximizing coiled tubing reach during logging extended horizontal wells using e-line agitator [C]//Kuwait International Petroleum Conference & Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2009.
- [10] Barton S, Baez F, Alali A. Drilling performance improvements in gas shale plays using a novel drilling agitator device [C]//SPE 144416, 2011.
- [11] 胥豪, 牛洪波, 唐洪林, 等. 水力振荡器在新场气田新沙21—28H井的应用[J]. 天然气工业, 2013, 33(3):64-67.
XU Hao, NIU Hongbo, TANG Honglin, et al. Application of hydraulic oscillators to the development of Well Xinsha 21-28H in the Xinchang Gas Field, Western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(3):64-67.
- [12] 田家林, 李友, 余长柏, 等. 钻井减摩振荡器工作特性研究与试验分析[J]. 机械设计, 2015, 32(11):6.
TIAN Jialin, LI You, YU Changbai, et al. Working mechanism and experimental analysis of drilling antifriction oscillator [J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(11):6.
- [13] 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.
- [14] 田家林, 杨应林, 朱志, 等. 基于旋转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.
- [15] Maidla Eric, Marc Haci. Understanding torque: the key to slide-drilling directional wells [C]//Paper Presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, March 2004. doi: <https://doi.org/10.2118/87162-MS>.
- [16] Burnett, Timm, Gee, et al. New technology enables rigs with limited pump pressure capacity to utilize the latest friction reduction technology [C]//Paper Presented at the SPE Eastern Regional Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, August 2013. doi: <https://doi.org/10.2118/165700-MS>.
- [17] 王杰, 夏成宇, 冯定, 等. 新型涡轮驱动水力振荡器设计与实验研究[J]. 工程设计学报, 2016, 23(4):391-395.
WANG Jie, XIA Chengyu, FENG Ding, et al. Design and experimental study on a new type of turbine driven hydraulic oscillator [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2016, 23(4):391-395.
- [18] 倪红坚, 韩来聚, 马清明, 等. 水力脉冲诱发井下振动钻井工具研究[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(2):15-17, 20.
NI Hongjian, HAN Laiju, MA Qingming, et al. Study on downhole vibration drilling tool induced by hydro-pulse [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(2):15-17, 20.
- [19] 李根生, 沈忠厚, 周长山, 等. 自振空化射流研究与应用进展[J]. 中国工程科学, 2005, 7(1):27-32.
LI Gensheng, SHEN Zhonghou, ZHOU Changshan, et al. Advances in investigation and application of self-resonating cavitating water jet [J]. Engineering Science, 2005, 7(1):27-32.
- [20] 李根生, 史怀忠, 沈忠厚, 等. 水力脉冲空化射流钻井机理与试验[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2):239-243.
LI Gensheng, SHI Huaizhong, SHEN Zhonghou, et al. Mechanisms and tests for hydraulic pulsed cavitating jet assisted drilling [J]. Petroleum Exploration & Development, 2008, 35(2):239-243.
- [21] 张毅, 李根生, 史怀忠, 等. 水力脉冲射流压力波动特性规律研究[J]. 石油机械, 2016, 44(2):17-22.
ZHANG Yi, LI Gensheng, SHI Huaizhong, et al. Study on pressure fluctuation characteristics of hydraulic pulsed jet [J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(2):17-22.
- [22] 鄢松意, 陶瑞东, 陈建华, 等. 自激振荡式旋转冲击钻井工具在大港板深19-64井的应用[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(6):114-116.
YAN Songyi, TAO Ruidong, CHEN Jianhua, et al. Application of self-excited oscillation drilling tools on Well Banshen 19-64 in Dagang Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(6):114-116.
- [23] 许京国, 尤军, 陶瑞东, 等. 自激振荡式冲击钻井工具在大港油田的应用[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(4):116-119.
XU Jingguo, YOU Jun, TAO Ruidong, et al. Application of self-oscillating impact drilling tool in Dagang Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(4):116-119.
- [24] 刘占魁, 张代娥, 杨军, 等. 自激振荡旋转冲击钻井技术应用[J]. 西部探矿工程, 2015, 27(8):48-50.
LIU Zhankui, ZHANG Daie, YANG Jun, et al. Application of self-oscillating rotary impact drilling tool [J]. West-China Exploration Engineering, 2015, 27(8):48-50.
- [25] 柳贡慧, 李玉梅, 李军, 等. 复合冲击破岩钻井新技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5):10-15.
LIU Gonghui, LI Yumei, LI Jun, et al. New technology with composite percussion drilling and rock breaking [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 44(5):10-15.
- [26] 汪伟, 柳贡慧, 李军, 等. 复合冲击钻井工具结构设计与运动特性分析[J]. 石油机械, 2019, 47(7):24-29.
WANG Wei, LIU Gonghui, LI Jun, et al. Structural design and motion behavior analysis of composite percussion drilling tool [J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(7):24-29.
- [27] 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.
- [28] 李玉梅, 张涛, 苏中, 等. 复合冲击频率配合特性模拟研究[J].

- 石油机械, 2019, 47(9): 30-35.
- LI Yumei, ZHANG Tao, SU Zhong, et al. Simulation study on compound percussion frequency matching characteristics [J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(9): 30-35.
- [29] 穆总结, 李根生, 黄中伟, 等. 振动冲击钻井提速技术现状及发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(3): 253-260.
- MU Zongjie, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Status and development trend of vibration-impact ROP improvement technologies[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(3): 253-260.
- [30] Beer F P, Johnston E R, Eisenberg E R. Vector Mechanics for Engineers. Statics-7th ed[M]. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2004: 412-414.
- [31] Amanullah, Amanullah. A multiple contaminant tolerant and eco-friendly water-based mud system for superior down hole performance[C]//Paper Presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2016. doi: <https://doi.org/10.2118/182894-MS>.
- [32] Schamp J, Estes B, Keller S. Torque reduction techniques in ERD wells[C]//IADC/SPE Drilling Conference, 2006.
- [33] Agbaji A L. Optimizing the planning, design and drilling of extended reach and complex wells[C]//SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition. OnePetro, 2011.
- [34] Skyles Lane P., Amiraslani Yosef A., James E. Wilhoit. Converting static friction to kinetic friction to drill further and faster in directional holes[C]//Paper Presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, San Diego, California, USA, March 2012. doi: <https://doi.org/10.2118/151221-MS>.
- [35] 张毅. 水力脉冲振荡减摩特性数值模拟与实验研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2016.
- ZHANG Yi. Numerical simulation and experimental study on a novel friction reduction tool with hydraulic pulsed jet[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2016.
- [36] WEI Minghui, LI Gensheng, SHI Huaizhong, et al. Theories and applications of pulsed jet drilling with mechanical specific energy[J]. SPE Journal, 2016, 21(1): 303-311.

(编辑 李艺)

2022年度《钻探工程》期刊高影响力学术论文

本刊讯 基于论文被引用和网络下载数量,编辑部对本刊2020—2022年刊登的论文进行统计打分,评选出了“2022年度《钻探工程》期刊高影响力学术论文”(优秀论文),名单如下:

序号	论文题目	作者姓名	作者单位	年, 卷(期)
1	地下水循环井修复技术发展现状综述	李乃营, 王 瑜, 孔令镨, 岳昌盛, 张治晖, 吕建国	中国地质大学(北京), 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 中冶建筑研究总院有限公司, 中国水利水电科学研究院	2021, 48(9)
2	水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望	吴纪修, 尹 浩, 张恒春, 孙华峰, 袁 维, 曹龙龙, 李鑫淼, 施山山, 王 文, 薛倩冰, 梁 楠	中国地质科学院勘探技术研究所, 中国地质调查局深部地质钻探技术研究中心, 自然资源实物地质资料中心, 石家庄铁道大学	2021, 48(5)
3	5000米智能地质钻探技术与装备研发	张金昌, 刘凡柏, 黄洪波, 梁 健, 王 瑜, 吴 敏, 陶士先	中国地质科学院勘探技术研究所, 中国地质装备集团有限公司, 中国地质大学(北京)工程技术学院, 中国地质大学(武汉)自动化学院, 北京探矿工程研究所	2020, 47(4)
4	青藏高原复杂地层地质钻探低固相冲洗液试验研究	袁进科, 陈礼仪, 王军伟, 乔友浩	地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 陕西铁道工程勘察有限公司	2021, 48(4)
5	直推钻探技术在污染场地调查中的应用现状研究	孙平贺	中南大学地球科学与信息物理学院	2021, 48(1)
6	川藏铁路3000m水平定向钻井技术方案	张恒春, 刘 广, 吴纪修, 王庆晓, 于好善, 刘志强, 许 洁	中国地质科学院勘探技术研究所	2020, 47(11)
7	基于人工智能的钻速预测模型数据有效性下限分析	李 谦, 曹彦伟, 朱海燕	成都理工大学环境与土木工程学院, 成都理工大学能源学院	2021, 48(3)
8	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	2021, 48(2)
9	干热岩耐高温钻井液的研究进展与发展趋势	刘 畅, 冉恒谦, 许 洁	中国地质科学院勘探技术研究所, 中国地质大学(北京)	2021, 48(2)
10	超声波辅助PDC切削齿振动破岩仿真分析	赵 研, 张丛珊, 高 科, 张增增, 赵大军, 李家晟, 吕晓妹, 平天才	吉林大学建设工程学院, 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 阿尔托大学工程学院, 泸西县自然资源局	2021, 48(4)

《钻探工程》编辑部

2022年12月