

# 坚硬地层用低温电铸孕镶脉冲石油钻头的研制 及其水力性能数值模拟

李大佛<sup>1</sup>, 龙新平<sup>2</sup>, 李天明<sup>1</sup>, 陈洪俊<sup>1</sup>, 雷 艳<sup>1</sup>, 刘红旗<sup>1</sup>, 许少宁<sup>1</sup>, 杨雪龙<sup>2</sup>

(1. 武汉地大长江钻头有限公司, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:**针对 PDC 钻头和牙轮钻头在坚硬、研磨地层中钻速较低、寿命短的问题, 研制了一种低温电铸孕镶脉冲石油钻头, 并对钻头的流场进行了数值模拟。现场应用表明, 该钻头具有寿命长、机械钻速高的特点。

**关键词:**孕镶钻头; 射流; 脉冲; 数值模拟

**中图分类号:** P634.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2012)04-0064-05

**Research on Development of Low-temperature Electroplated Impregnating Pulse Petroleum Bit and Numerical Simulation of the Hydraulic Performance/LI Da-fu<sup>1</sup>, LONG Xin-ping<sup>2</sup>, LI Tian-ming<sup>1</sup>, CHEN Hong-jun<sup>1</sup>, LEI Yan<sup>1</sup>, LIU Hong-qi<sup>1</sup>, XU Shao-ning<sup>1</sup>, YANG Xue-long<sup>2</sup>** (1. Wuhan Dida Changjiang Bit Co., Ltd., Wuhan Hubei 430074, China; 2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei 430072, China)

**Abstract:** According to the low drilling speed and short service life of PDC bit and cone bit in hard and abrasive formation, a low temperature electroplated impregnating pulse petroleum bit was developed, and numerical simulation of flow field of the bit was made. The field application shows that the bit has long service life and high penetration rate.

**Key words:** impregnated bit; jet; pulse; numerical simulation

## 0 引言

众所周知, 对于特别坚硬、研磨性强、互层频繁、且含有石英和砾石夹层的地质, PDC 钻头很难钻进, 机械钻速较低, 其破坏形式磨损快, 且复合片容易破裂, 因此寿命很低。而牙轮钻头钻进也因为该类地层坚硬等缘故, 钻进效率很低, 且容易造成孔内掉牙轮等事故发生, 这是目前国内石油钻探中遇到的技术难题。针对上述难题, 我们探索采用新的途径, 研制了低温电铸孕镶脉冲石油钻头(图 1)。该钻头完全有别于牙轮钻头和无压浸渍 PDC 钻头, 不仅外形完全不同, 外表连金刚石也看不到, 生产工艺也完全不同。PDC 钻头是在火里烧出来的, 而低温电铸孕镶脉冲石油钻头是在室温水里长出来的。钻头上的金刚石在工作时是一层一层地出露或更新, 或者说也是一层一层地淘汰或脱落, 参与工作的始终是新的金刚石, 在地层和钻进参数不变的条件下, 钻头所表现的机械钻速是恒定的, 钻头上的金刚石不会被磨钝, 因为金刚石的硬度比所钻岩石的硬度大得多, 金刚石只有脱落或者碳化。鉴于该钻头破碎岩石具有上述特点, 合理的水射流配置和钻头

水道的流场分布对钻头的寿命有很大的影响。

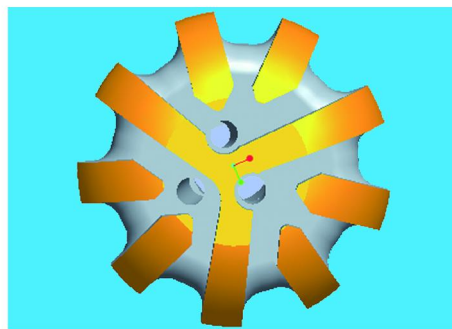


图 1 低温电铸孕镶脉冲石油钻头三维图

## 1 低温电铸孕镶脉冲石油钻头设计特点

### 1.1 低温

制造无压浸渍 PDC 钻头, 生产过程中需 1000 °C 以上高温, 而低温电铸孕镶脉冲石油钻头的全过程是在室温环境中进行的, 只需 20 ~ 30 °C 的常温, 因而极大地保护了金刚石的原有强度, 完全避免了金刚石的高温损伤。

### 1.2 机械性能好

形成钻头胎体的溶液成分中, 没有采用有机物

收稿日期: 2011-12-06

基金项目: 中国石油化工集团 2010 年科研项目(SG10028)

作者简介: 李大佛(1937-), 男(汉族), 湖南南县人, 武汉地大长江钻头有限公司总经理、教授, 机械专业, 从事低温电镀金刚石钻头的研制工作, 湖北省武汉市鲁磨路 388 号, ztgs@cug.edu.cn。

和添加剂,因而形成的胎体金属性能强度高、韧性好、经得起钻进生产中的冲击与碰撞。虽然镀层表面不够光亮,也不太平整,但适当粗糙表面的钻头下到井底有利于进尺,并可减少初磨时间。

### 1.3 金刚石工作高度厚、孕镶层数多

低温电铸孕镶脉冲石油钻头所镀金刚石层一般都在8 mm甚至10 mm以上的厚度。如果在钻进使用中,其金刚石磨耗殆尽,应该有较长的使用寿命或较多的进尺。

钻头每天孕镶一层金刚石,一共孕镶20多层金刚石,加上钻头钢体加工的时间,生产一只钻头需要1个月的时间。生产周期较长,但如果有一定批量,生产效率并不低。

### 1.4 恒定的机械钻速

钻头上的金刚石是埋在胎体金属里面的,或者说是孕镶在NiCo胎体金属里面的,只有胎体金属磨耗后,金刚石才会出露或更新,也有人称之为自锐。因此,胎体消耗是关键,胎体消耗速率直接决定着机械钻速高低,一般说来,胎体消耗快,机械钻速高,胎体消耗慢,机械钻速则低。但是不是胎体消耗越快越好呢?其实不然,因为胎体消耗过快,金刚石还没有充分发挥作用就会自动脱落,这样钻头表现的机械钻速虽然较高,而钻头寿命或进尺则会较低。相反,如果胎体消耗过慢,金刚石不会及时出露或自锐,这样钻头寿命也许较高,但机械钻速会较低。在坚硬地层钻进,提高机械钻速是主要矛盾,或者说是主要经济指标。因此要想办法使胎体消耗而保证较高的机械钻速和较长的钻头寿命。

钻头上的金刚石在工作时是一层一层地出露或更新(如图2、图3所示),或者说也是一层一层地淘汰或脱落。参与工作的始终是新的金刚石,在地层和钻进参数不变的条件下,钻头所表现的机械钻速是恒定的,钻头上的金刚石不会磨钝,因为金刚石的硬度比所钻岩石的硬度大得多,金刚石只有脱落或碳化。

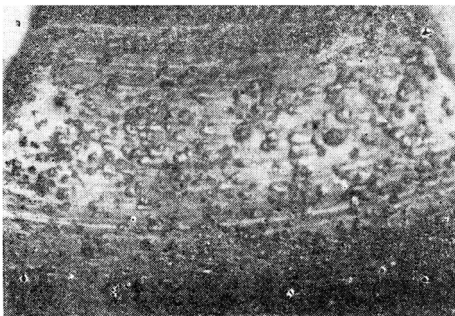


图2 金刚石出露放大照片(6.3×)

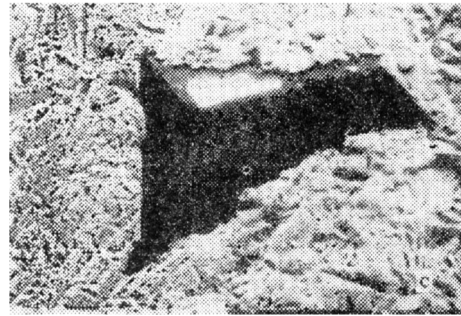


图3 金刚石出露放大照片(400×)

## 2 低温电铸孕镶脉冲石油钻头流场数值模拟<sup>[1~4]</sup>

### 2.1 钻头几何模型及网格划分

钻头的转速为180 r/min,泵压20 MPa,排量30 L/s。布置3个喷嘴。低温电铸孕镶脉冲石油钻头的几何建模由Pro/ENGINEER软件完成。钻头在旋转推进过程中,岩层受到挤压,接触面最有可能与钻头顶部的形状接近。故为了充分考虑岩层接触面对水道流动的影响,计算采用曲底井筒,同时将钻头水道流场进行相应延伸。流场进口外延至钻杆,位于坐标原点200 mm上方处( $Z=200$  mm的平面处),该处流动为管流。流场出口延伸至距井底260 mm处。此处流场可认为是充分发展的流动,符合钻头推进的物理规律,其计算区域如图4所示。

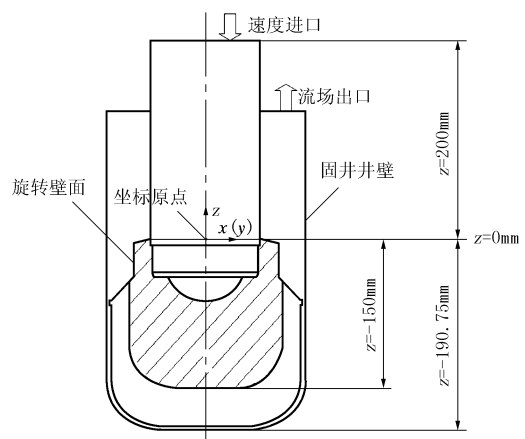


图4 计算区域示意图

低温电铸孕镶脉冲石油钻头流道结构相对复杂,为了精确模拟钻头推进的物理过程,采用ANSYS ICEM CFD进行非结构网格划分,并对压力和速度梯度较大的区域局部加密。经比较,整个计算区域网格数约为170万,能满足计算要求。图5给出了低温电铸孕镶脉冲石油钻头的模型的网格划分。

### 2.2 控制方程与边界条件

已有的研究成果表明,在不考虑非定常效应的

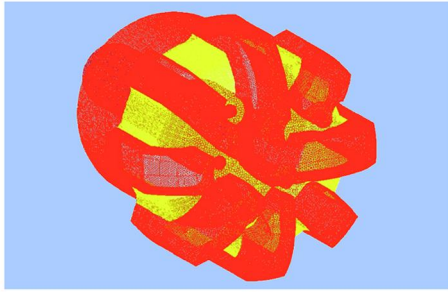


图5 低温电铸孕镶脉冲石油钻头网格示意图

情况下,将钻头内的流动处理成三维定常湍流流动,所得结果是满足工程要求的。故该计算区域内的流动可考虑为三维定常流动。控制方程可用雷诺平均  $N-S$  方程(RANS)来描述。由于标准  $k-\varepsilon$  模型用于强旋转流或带有弯曲壁面流动时会出现失真,而 RNG  $k-\varepsilon$  模型通过修正湍动粘性系数和在  $\varepsilon$  方程中增加了反映主流的时均应变率,考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况,可更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动问题。因此,本文采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型来封闭雷诺平均  $N-S$  方程<sup>[5]</sup>。

钻头内流场工质为清水,设计工况下其流量  $Q=30\text{ L/s}$ 。根据进口直径可求得进口平均流速,作为进口边界条件。流速沿3个坐标方向  $x, y, z$  的分量分别表示为  $v_x, v_y, v_z$ 。钻头推进过程中沿  $Z$  轴旋转,故来流方向为  $Z$  轴,即  $v_z=11.76\text{ m/s}$ ,而横向流速  $v_x=v_y=0$ 。而流场的出口为充分发展流动,边界上沿垂直于该断面方向的压力梯度为零,此外还有:

$$\frac{\partial v_x}{\partial n} = \frac{\partial v_y}{\partial n} = \frac{\partial v_z}{\partial n} = \frac{\partial k}{\partial n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0 \quad (1)$$

式中: $n$ ——出口断面流动的法线方向。

钻井侧壁、底面均为固体壁面,该处边界条件均采用壁面边界条件。即固壁处的节点应用无滑移条件,而对紧靠固壁处节点的紊流特性则应用了壁函数方法进行处理,以减少靠近固壁区域的网格节点数。采用有限体积法离散对应的控制方程,离散格式均采用一阶迎风格式。利用 SIMPLE 算法来解决速度和压力耦合问题,以残差低于  $10^{-5}$  且进、出口流量相对误差低于 0.5% 作为收敛标准<sup>[6]</sup>。

### 2.3 内部流场分布

井底流场的压力分布与钻头推进关系密切。较高的井底压降(井底范围内最高压力与最低压力的压差),可以保证较高的流速,以使岩屑被液流带离井底。同时,局部较大的压力波动容易造成回流,滞留岩屑。图6为喷嘴出口截面的压力分布。

如图6所示,喷嘴出口处的压力较低,容易卷吸

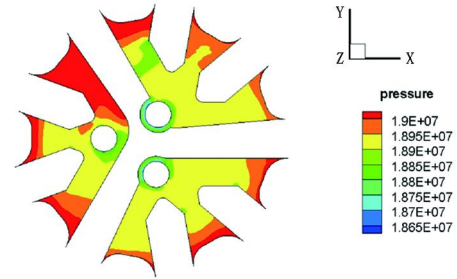


图6 喷嘴出口截面压力分布(Pa)

周围液流,带走岩屑。相比而言,低温电铸孕镶脉冲石油钻头整体的压力分布比较均匀,各喷嘴间相互影响较小,流场相对均匀。随着喷嘴出口射流扩展,压力得到一定恢复,而钻头外缘处压力下降。射流离开喷嘴越远,射流中心处压力恢复越高,而外缘压力分布越来越均匀。

钻头在推进过程中,内部流体与钻头以同一角速度旋转,故其相对于钻头壁面的速度反映了内部流动的真实状况,图7给出了2种PDC钻头的三维相对速度的流线图。

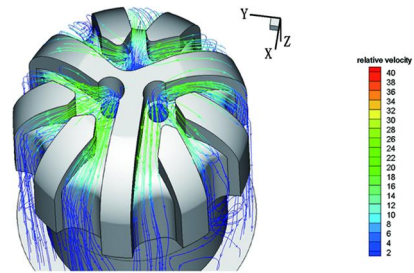


图7 计算区域相对速度的流线分布

如图7所示,由于扣除了钻头旋转的圆周速度的影响,因此流体从水道槽中沿轴向流出。高速水流经喷嘴流出后,受到井底阻挡,向四周扩展,带走切削产生的碎屑。

### 2.4 最小流速区域分析

岩屑被钻头切屑后随喷嘴喷出的高压水流在水道内流动,由于岩屑发生机理及粒径、密度、体积分数、形状等参数未知,故岩屑颗粒随水流流动的跟随性不好判断。一般而言,对形状、粒径比较均匀且密度与水接近的颗粒,当流速较大时,可认为其流速与水流基本相同,岩屑颗粒随水流从水道中流出;而当水流流速小于某一数值时,岩屑颗粒与水流质点的跟随性变差,易于沉积下来。该水流流速在水力学中称为淤积流速,与多种因素有关,一般情况下可取  $0.5 \sim 0.6\text{ m/s}$ 。参考这一数值,可设定当相对流速小于  $0.5\text{ m/s}$  时,会发生岩屑颗粒的沉积。随着钻头的旋转,沉积下来的岩屑对钻头进行研磨,造成钻



头的破坏。因此,确定淤积流速(最小流速)发生的区域,即可大致定量确定岩屑易于沉积的并对钻头造成破坏的位置。

为了分析最小流速区域,重新规定了速度比尺为 0~1 m/s。图 8 所示为不同位置截面的最小速度分布。结合水力学相关资料及流动规律可以判断,固体颗粒在这些区域内极易出现低速沉积现象,

从而磨损切削齿,造成钻头破坏。从图 8 可以看出,喷嘴出口特征断面内在大约 1/2 半径处及钻头外侧有较小的区域流速在 0.5 m/s 左右;在切削齿中部断面,低速区域大量减少;而到了钻头顶部,钻头外侧出现了 3 处较小的低速区域,不会有较多的岩屑沉积,不可能对钻头造成破坏。

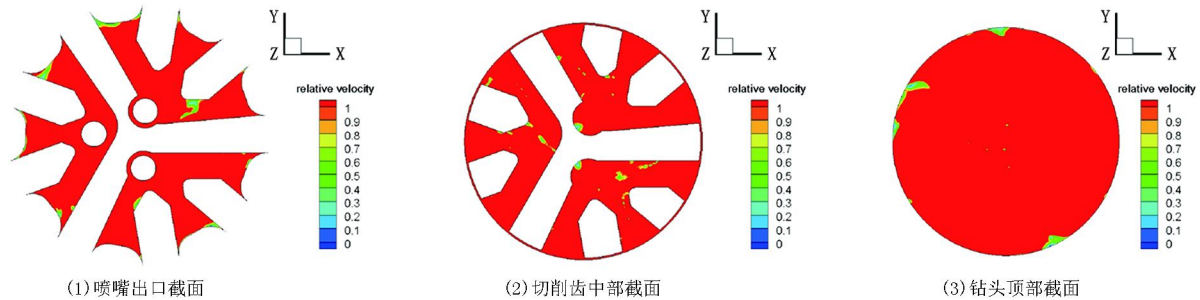


图 8 流场不同截面速度分布

### 2.5 表面冲蚀区域分析

钻头的损坏除了岩屑沉积造成的磨蚀外,高速含固水流的冲刷也会损坏钻头表面。当水流夹带岩屑高速运动时,会造成过流表面的冲刷磨蚀破坏。冲刷磨蚀在高速水流的过流表面处处存在,有明显的方向性。钻头遭磨蚀冲刷与岩屑的冲角有很大的关系,冲角的大小决定着破坏机理。造成壁面冲刷磨蚀的因素很多,涉及到多相介质的运动特性和相互作用。影响冲刷磨蚀的水力参数主要有水流速度、水流流态、过流历时和水中固体颗粒含量、粒径与形状。其中,水流速度和角度是影响冲刷磨蚀的决定性因素。一般而言,冲刷磨蚀量与过水历时基本成线性关系。而固体颗粒的影响程度主要表现在与壁面碰撞几率的大小。岩屑量越大,参与冲击壁面的固体颗粒越多,冲刷磨蚀率越大。

扰动水流将产生大量的漩涡,漩涡的形成和破灭增加了岩屑对壁面的作用力。由图 9 可以看出低温电铸孕镶脉冲石油钻头在各刀片尖部有相对高的相对流速,且这些区域水流流速正向冲击牙片,使金刚石在工作时是一层一层地显露或更新,保持钻头有恒定的机械钻速。

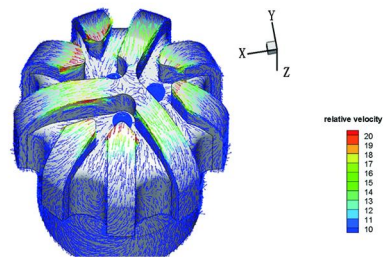


图 9 钻头表面相对速度矢量图

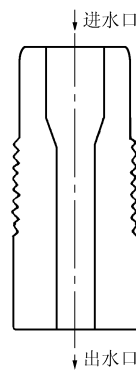


图 10 普通喷嘴示意图

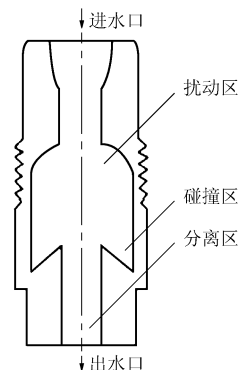


图 11 脉冲喷嘴示意图

### 3 低温电铸孕镶脉冲石油钻头的脉冲性能<sup>[7-9]</sup>

自激振荡脉冲射流其特点是在不需要任何辅助装备的条件下依靠自身具有的自激振荡腔室,产生振荡放大和反馈作用,使射流产生振荡脉冲,将连续射流变为脉冲射流。图 10、11 分别为普通喷嘴和脉冲喷嘴示意图。

当一股射流向下游流动时,射流中一定频率范围内的涡量扰动得到放大,在射流层中形成一连串离散涡环,当其达到碰撞壁并与之相互作用时,在碰撞区产生压力振荡波,该波以声速向上游传播,又诱发新的涡量脉动。若分离区与碰撞区的压力脉动互相为反相就会形成涡量扰动—放大—新的涡量脉动产生的循环过程。该过程不断的重复,就会形成强烈的自激振荡脉冲射流。

利用自激振荡脉冲射流理论,研制自激振荡脉

冲射流装置,安装在孕镶石油钻头上面,进行油田钻孔生产实践在我国还属先例。它是将泥浆泵提供的连续射流,通过脉冲装置内的特殊腔室边界条件的碰撞产生压力振荡波,形成强烈的自激振荡脉冲射流。

根据实验发现这种射流有较大的变压特性,在相同条件下,与现有的普通喷嘴比较,脉冲射流十分集中,瞬时冲击力提高2倍左右,有效喷距提高1.5倍左右,而且冲蚀岩石的体积提高2倍左右。因此,应用该理论研制出适合低温电铸孕镶脉冲石油钻头钻进的自激振荡脉冲射流喷嘴,安装在孕镶石油钻头的水眼内,依靠自身所具有的自激振荡腔室和特殊的边界条件将连续射流转变成脉冲射流,大大提高了钻井速度和钻头寿命,同时也使破碎的岩屑粒径增大2~4倍,而且是在不需要增加任何辅助装备的条件下产生的经济效果。这对于提高石油勘探速度、攻克坚硬复杂难钻地层都具有重要意义。

#### 4 现场试验与结果分析

2010年11月中原钻井四公司在元陆六井使用了低温电铸孕镶脉冲石油钻头,型号为8½ WHX061,使用井段为3908.3~3938.01 m(自流井东岳庙段),进尺29.71 m,纯钻时间31.75 h,钻压50~70 kN,转速:螺杆+60 r/min,排量25 L/s,泵压17~20 MPa,机械钻速0.94 m/h。图12为该钻头入井前和出井后的照片。

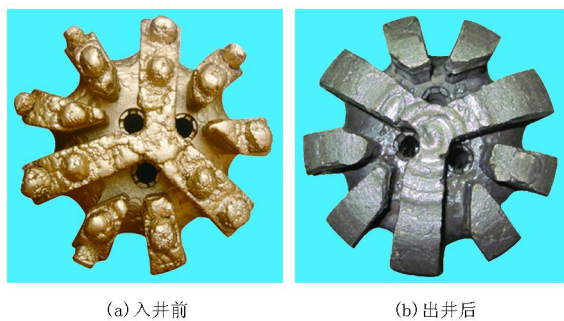


图12 低温电铸孕镶脉冲石油钻头入井前和出井后的照片

元陆六井在自流井组使用低温电铸孕镶脉冲石油钻头(型号为WHX061)之后紧接着下了4只牙轮钻头,其经济指标对比如表1所示。

由表1可以看出,4只牙轮钻头总进尺35.39 m,单只平均进尺8.847 m,平均机械钻速0.61 m/h,WHX061低温电铸孕镶脉冲石油钻头比牙轮钻头平均机械钻速提高了54%,比牙轮钻头单只钻头寿命提高了235%。

表1 低温电铸孕镶脉冲石油钻头和牙轮钻头使用效果对比

层位	钻头型号	井段 /m	泥浆密 度/(g cm <sup>-3</sup> )	进 尺 /m	纯钻 时间 /h	机械钻 速/(m h <sup>-1</sup> )
自流井组	WHX061 (武汉地大)	3908.3~3938.01	1.66	29.71	31.75	0.94
自流井组	HJT537GK	3938.01~3944.17	1.66	6.16	10.14	0.60
自流井组	SJT637GHL	3944.17~3953.32	1.66	9.15	15.66	0.58
自流井组	SJT637GHL	3953.32~3961.79	1.66	8.47	12.6	0.67
自流井组	HJT637GL	3961.79~3973.40	1.66	11.61	19.2	0.60

#### 5 结论

针对坚硬地层,PDC钻头很难钻进,而牙轮钻头钻进效率很低,且易造成孔内掉牙轮等事故,研制的低温电铸孕镶脉冲石油钻头解决了这一问题。并对该钻头进行了水力分析和现场试验,得出以下结论。

(1)低温电铸孕镶脉冲石油钻头整体的压力分布比较均匀,各喷嘴间相互影响较小,流场相对均匀。钻头中心有相对高的相对流速,且这些区域水流流速正向冲击牙片,使金刚石在工作时是一层一层地显露或更新,保持钻头的恒定的机械钻速。

(2)安装脉冲喷嘴在电铸孕镶石油钻头的水眼内,依靠自身所具有的自激振荡腔室和特殊的边界条件将连续射流转变成脉冲射流,大大提高了钻井速度和钻头寿命。

(3)经现场试验,与同区块同井段使用的牙轮钻头相比,低温电铸孕镶脉冲石油钻头机械钻速提高了54%以上,钻头寿命提高了235%以上。目前,已在四川元坝地区和内蒙古两干地区比较坚硬的地层推广应用,取得了好的经济指标和明显的经济效益。

#### 参考文献:

- [1] Watson G R. Using new computational fluid dynamics techniques to improve PDC bit performance[J]. SPE37580,1997.
- [2] Akin J. E. New nozzle hydraulics increase ROP for PDC and rock bit[J]. SPE37578,1997.
- [3] 何林峰,谢翠丽,陈康民. 流道形状对PDC钻头头部流场影响的数值模拟[J]. 上海理工大学学报,2007,29(1):59-64.
- [4] 黄红梅,翟应虎,等. 实体PDC钻头流场数值模拟与实验验证[J]. 石油大学学报(自然科学版),2005,29(3):49-52.
- [5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 陕西西安:西安交通大学出版社,2001. 370-376.
- [6] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004. 144-158.
- [7] 张于贤,王春明,王红. 自激振荡脉冲射流喷嘴的试验研究[J]. 机械研究与应用[J]. 2004,17(5):44-46.
- [8] 李天明,李大佛,雷艳,等. 自激振荡脉冲射流提高PDC钻头机械钻速实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(11):74-77.
- [9] 李大佛. 金刚石、PDC钻头与工艺学[M]. 北京:地质出版社,2008. 332-335.