

高速旋转冲击钻井破岩数值模拟及现场实验

景英华¹, 袁鑫伟¹, 姜磊², 张恒², 倪红坚²

(1. 中国石油天然气集团西部钻探工程有限公司, 新疆库尔勒 841000;

2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:为提高深井地层破岩效率,提出螺杆高速旋转条件下配合井下冲击破岩工具的高速旋冲钻井新模式,通过数值模拟研究单个 PDC 齿在不同工况下岩石的动态破碎过程,并进行高速旋冲钻井现场试验。结果表明:在旋转冲击钻井中,钻头转速增加,钻头吃入地层深度减少,前进阻力增大且波动更为剧烈,岩石破碎效率提高;增大钻头上的冲击力,钻头吃入地层的深度增加,岩石破碎效率提高;增大钻头上冲击力频率,岩石破碎效率提高;螺杆钻具结合自激振荡式高速旋转冲击钻井工具形成的自激振荡式高速旋转冲击钻井技术提高了钻头转速,相对于单独螺杆钻进,提高了切削齿的吃深。

关键词:破岩模拟;冲击钻井;螺杆钻具;自激振荡;现场试验

中图分类号:TD 43 **文献标志码:**A

引用格式: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.

Numerical simulation and field experimental study on rock breaking in high speed rotating percussion drilling

JING Yinghua¹, YUAN Xinwei¹, JIANG Lei², ZHANG Heng², NI Hongjian²

(1. CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited, Korla 841000, China;

2. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: In order to improve the rock-breaking efficiency of deep well, a new high-speed rotary impact drilling assembly mode combine with high-speed rotating PDM and percussion drilling tool was proposed. The dynamic fracture process of rock under different working conditions of single PDC tooth was studied by numerical simulation and the filed test was carried out. The results show that during rotary impact drilling, the depth of the PDC eats into the rock decreases as rotary speed increases, the forward resistance increases. The fluctuation is more severe, and the rock breaking efficiency increases. Also the bit rotation speedis improved by the self-oscillation high-speed rotary drilling technology, which is combined with PDM and self-oscillation rotary drilling tool. And the eating depth of the PDC teeth is improved compared to the single PDM drilling.

Keywords: rock breaking simulation; percussion drilling; PDM; self-oscillation; field test

旋转冲击钻井中,“液动冲击器+PDC 钻头”钻井在现场试验中取得良好的提速效果^[1]。自激振荡式旋转冲击钻井工具是液动冲击器的一种,它区别于传统液动冲击器,具有无机械活动易损部件、冲击力来

源于钻井液流体的自激振荡、稳定性强、寿命长等优点^[2-5]。螺杆钻具配合自激振荡式旋转冲击钻井工具,通过高速旋转冲击钻井可有效提高机械钻速。旋转冲击破岩提速主要原因是冲击增加了钻头吃入地

层深度^[6-7],且岩石呈体积破碎状态。笔者采用显式动力学有限元模拟 PDC 钻头在双向载荷作用下的破岩过程,对比常规钻进、旋冲钻进及高速旋冲钻进 3 种钻进状态下,钻头转速、冲击力、冲击频率等对破岩效率的影响,揭示高速旋转冲击破岩的提速机制。

1 数学物理模型

1.1 基本假设

假设:①PDC 齿为硬质合金处于弹性无塑性变

形状态;②将微小时间段内 PDC 齿的螺旋切削等效为平面切削;③岩层无限大。

1.2 物理模型及网格划分

模拟中研究单个 PDC 齿切削岩石,物理模型及其网格划分见图 1。其中 W 为作用在单 PDC 上的钻压, kN ; v 为前进速度, m/s 。复合片尺寸为 $\Phi 17\text{ mm}\times 3\text{ mm}$,岩石尺寸为 $80\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 30\text{ mm}$,PDC 齿后倾角为 20° ,PDC 齿初始吃入深度设计为 2 mm 。为了节省计算时间取模型对称的一半进行计算。

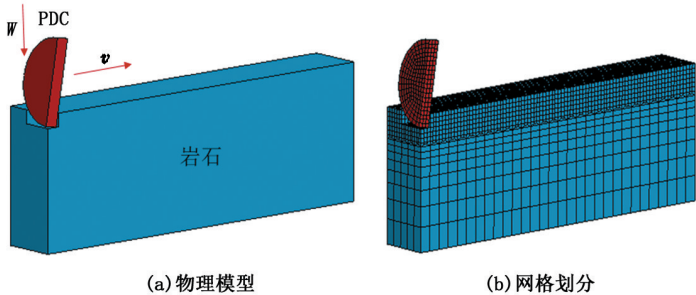


图 1 PDC 岩石物理模型及网格划分

Fig. 1 Physical model and its meshing of PDC

1.3 材料定义及参数设置

PDC 齿材料为硬质合金,设置为刚体,密度 $\rho = 15.0\times 10^3\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 579\text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.22$ 。岩石材料设置为混凝土,采用 HJC 模型^[7-9]定义。选用的材料模型参数见表 1。其中 G 为材料剪切模量, GPa ; ρ 为材料的密度, kg/m ; f_c 为材料抗压强度, GPa ; T 为材料所能承受的最大拉应力, GPa ; A 为归一化黏聚强度参数; B 为归一化压力硬

化参数; N 为压力硬化指数; C 为应变率系数; D_1 和 D_2 为材料损伤参数; S_{max} 为归一化最大强度极限; p_{crush} 和 p_{lock} 为材料线弹性范围内单轴抗压强度测试过程中压力和材料压实压强, GPa ; μ_{crush} 和 μ_{lock} 分别为材料线弹性范围内单轴抗压强度测试过程中体积应变和视体积应变; EF_{min} 为材料断裂塑性应变; K_1 、 K_2 、 K_3 为与材料相关的常数, GPa ; F_s 为与软件相关的参数。

表 1 混凝土 H-J-C 材料模型参数

Table 1 H-J-C material model parameters of concrete

G/GPa	S_{max}	A	B	C	N	D_1	D_2	K_1/GPa	K_2/GPa
12.61	7.0	0.79	1.6	0.07	0.61	0.04	1	85	-171
$\rho/(kg\cdot m^{-3})$	p_{crush}/GPa	μ_{crush}	p_{lock}/GPa	μ_{lock}	EF_{min}	f_c/GPa	F_s	T/GPa	K_3/GPa
2240	0.016	0.001	0.8	0.1	0.01	0.0371	-1	0.003	208

HJC 模型的强度以规范化等效应力描述为

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}](1 + C \ln \varepsilon^*). \tag{1}$$

式中, $\sigma^* = \sigma/f_c$, 表示实际等效应力与静态屈服强度的比值; $p^* = p/f_c$, 为无量纲压力; $\varepsilon^* = \varepsilon/\varepsilon_0$, 为无量纲应变率; D 为损伤参数, $0 \leq D \leq 1$, 当 $D = 0$ 时表示岩石没有损伤, 当 $D = 1$ 时表示材料完全损伤破坏。

1.4 边界条件及载荷

模拟计算中,限定岩石底端面所有自由度,岩石的切面对称约束,为模拟无限大地层,3 个周面设置为非反射边界条件,沿 x 方向施加速度载荷,并限定其 z 方向的平动自由度及所有旋转自由度。

假设 PDC 钻头直径为 215.9 mm ,钻压为 40 kN , 23 cm 自激振荡式旋转冲击钻井工具形成的冲击力约为 16 kN ,任意时刻有 20 个齿与地层接触,则旋转冲击钻进过程中,所建立的 1/2 片 PDC 齿受压力载荷在 $1 \sim 1.4\text{ kN}$ 间周期波动,周期为 2 ms (自激振荡式旋转冲击钻井工具的振荡频率为 $500 \sim 700\text{ Hz}$)。

2 数值模拟结果

图 2 为高速旋冲破岩过程中 PDC 齿切削岩石的不同时刻的内部等效应力分布云图。可以看出,在钻压和冲击载荷的作用下,PDC 齿沿着岩石表面的切向和法向运动,接触部分岩石应力逐渐增加,当

达到岩石材料的屈服极限时,岩石破碎并被移除,实现对高速旋转冲击钻井破岩过程的模拟。

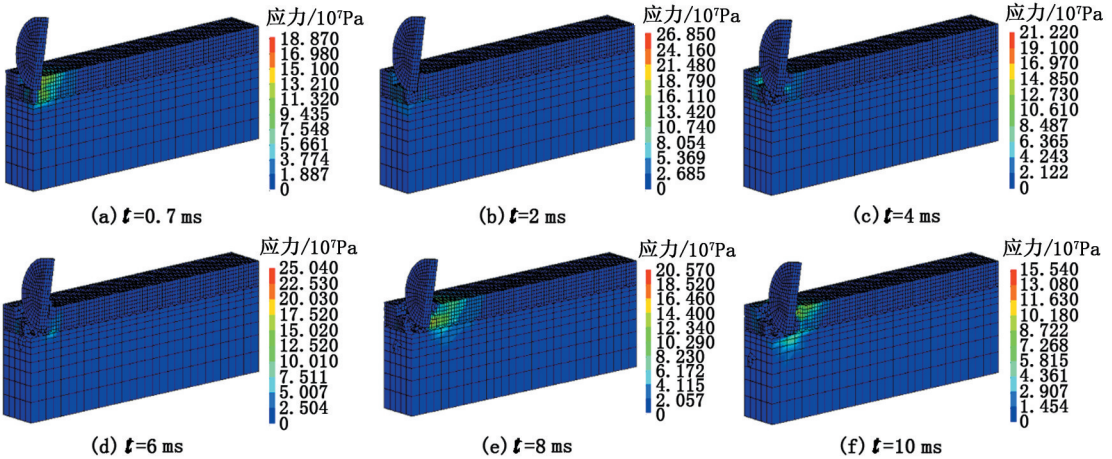


图 2 同时刻岩石内部等效应力云图

Fig. 2 Equivalent stress cloud map of rock at different times

基于上述模拟方法,以相同时间内破碎岩石的体积即岩石失效单元的数量作为衡量破岩效果的标准,同时考察 PDC 齿吃入岩层的深度。图 3 为岩石破碎过程中 PDC 齿前进阻力的变化。可以看出,单齿 PDC 前进切削岩石过程中,在有冲击力作用下和没有冲击力作用下 PDC 齿受到的前进阻力随时间

0.314 m/s,为计算方便取 $v=0.3\text{ m/s}$,高速旋冲工况下取 $v=0.6$ 和 $v=0.9\text{ m/s}$,即此时钻头转速分别为 115 和 172 r/min。图 4 为 3 种转速下岩石的破碎情况(其他参数均相同)。

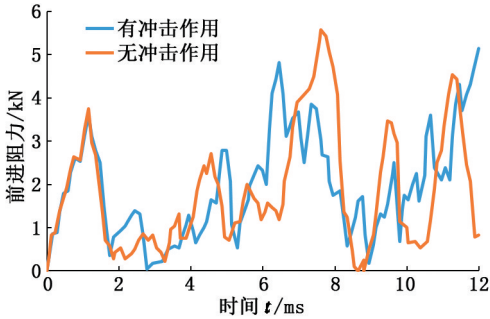


图 3 前进阻力随时间波动情况

Fig. 3 Forward resistance fluctuates with time

而波动。因为岩石达到屈服强度以后脱离本体,模拟中失效的单元是立即删除,因此切削力骤降,这种变化规律反应了 PDC 切削岩石过程中“跃进式”的破碎特性^[11-12]。从图 4 的 PDC 齿前进阻力可以看出,虽然有冲击作用下 PDC 齿的吃入地层深度增加,二者前进阻力上却相差不大,表明冲击振动减少了钻头的前进阻力,并且模拟后期冲击作用下 PDC 齿的前进阻力的变化更稳定,表明冲击振动减少了钻头的黏滑效应。

2.1 钻头转速对破岩效率的影响

模拟中设置冲击频率为 500 Hz,则冲击力作用的周期为 $T=2\text{ ms}$;假定选择某个 PDC 齿距离钻头中心的距离为 $r=0.05\text{ m}$,常规旋转冲击钻进时转盘转速为 $N=60\text{ r/min}$,则 PDC 齿的前进速度为 $v=$

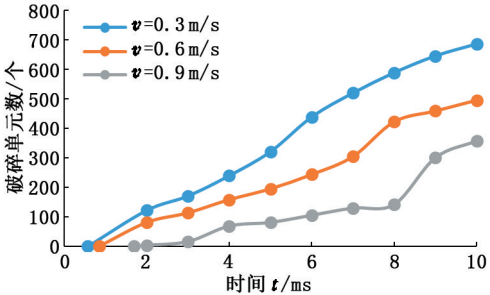


图 4 不同转速下岩石破碎情况

Fig. 4 Rock elements failed at different speeds

从图 4 看出转速对破岩效率的影响比较明显,转速越大单位时间内破碎岩石的体积越大,当钻头转速由 0.3 m/s 提高到 0.9 m/s 时单位时间破碎岩石体积即破岩效率提高了近 1 倍。图 5 为 3 种工况下 PDC 齿前进阻力的变化情况,可以看出钻头转速越快,钻头前进的阻力变化越剧烈。

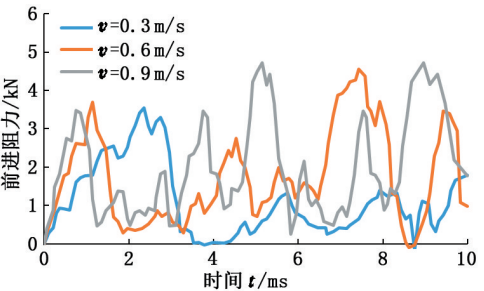


图 5 不同转速下前进阻力变化情况

Fig. 5 Change of forward resistance at different rotational speeds

2.2 冲击力对破岩效率的影响

模拟高速旋转冲击工况下相同冲击频率不同冲击力幅值的岩石破碎情况,其中 $v = 0.6 \text{ m/s}$, $W = 1 \text{ kN}$,冲击力频率为 500 Hz,冲击力幅值分别为 0(即无冲击作用)、300、350、400 和 450 N。图 6 为不同冲击力幅值作用下岩石破碎情况。可以看出,在其他条件相同的情况下岩石破碎单元的数量随冲击力的幅值增大而增大,即冲击力的增加能提高旋冲破岩的效率,其中有冲击作用下岩石破碎效率提高了 54.6% ~ 97.8%。

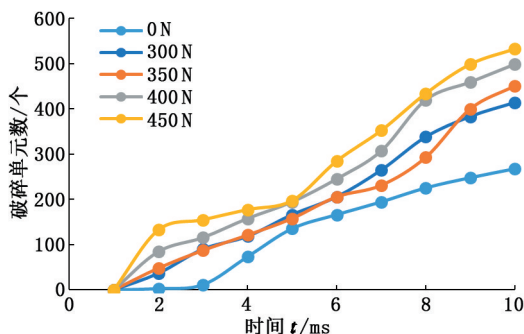


图6 不同冲击力作用下岩石破碎情况

Fig.6 Rock elements failed under different impact forces

图 7 为不同冲击力作用 PDC 齿吃入岩层的深度曲线。可以看出,在其他条件相同冲击力幅值不同的条件下 PDC 齿吃入地层深度随冲击力的增大而增大,印证了破碎体积随冲击力的增大而增大的变化规律。

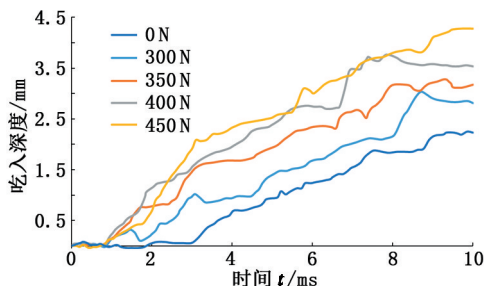


图7 不同冲击力作用下 PDC 齿吃入地层深度情况

Fig.7 Depth of PDC penetrating rock under different impact force

2.3 冲击频率对破岩效率的影响

模拟高速旋冲状态不同频率对破岩效果的影响,边界条件设置为: $v = 0.6 \text{ m/s}$, $W = 1 \text{ kN}$,假设不同频率下冲击力幅值均为 400 N,分别模拟冲击频率为 0、100、200、400 和 500 Hz。结果见图 8。

从图 8 看出,在冲击力幅值及其他条件相同的情况下,岩石破碎单元的数量随冲击频率的增大而增大,其中频率从 200 到 500 Hz 岩石破碎效率是增加的,增加幅度为 24.2% ~ 85.1%,且 100 Hz 与 200 Hz 冲击力作用下破碎效率较为接近,400 Hz 与

500 Hz 冲击力作用下破碎效率较为接近,结合图 7、图 8 表明,冲击力幅值的增加相比冲击频率的增加对破岩效率的影响更大。

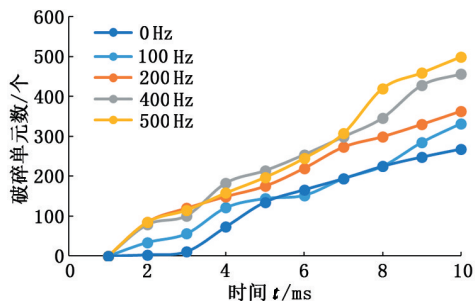


图8 不同冲击频率作用下岩石破碎情况

Fig.8 Rock elements failed under different impact frequency

3 高速旋转冲击破岩提速机制

通过对旋冲破岩中钻头转速、冲击力幅值及冲击频率的控制变量单因素模拟研究可以看出,高速旋转冲击相比于旋转冲击在使用相同的自激振荡式冲击工具后,正是由于提高了转速从而提高了破岩效率,而相比于常规的旋转钻进既提高了钻头转速又增加了钻头的吃入地层深度从而提高破岩效率。图 9 为 3 种不同工况下的岩石破碎情况。

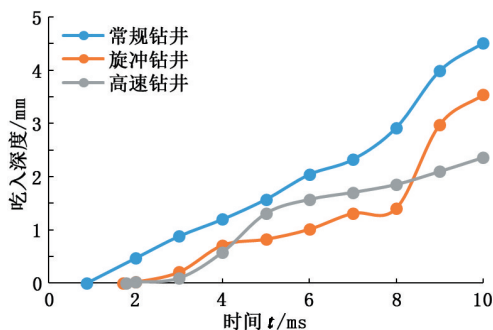


图9 不同工况下岩石破碎情况

Fig.9 Rock elements failed under different working conditions

从图 9 看出,破岩效率由高到低依次为高速旋冲钻进、旋冲钻进和常规旋转钻进,而且在常规钻进过程中岩石破碎过程比较线性,旋冲钻进和高速旋冲钻进都有一个短时间内破碎岩石的体积突然增加的过程,表明冲击破岩的过程有一个能量积蓄到突然释放的过程,反映到宏观上是“体积破碎”。

图 10 为 3 种不同工况条件下 PDC 齿吃入岩石的深度。可以看出,旋冲破岩过程中单个 PDC 齿吃入岩石的深度都明显高于常规钻进,且高速旋冲破岩与旋冲破岩在钻压及冲击力幅值不变但前进速度增加的情况下,牙齿的吃入深度有所降低,表明高速旋冲破岩过

程中转速和冲击力同时影响着切削齿吃入深度。

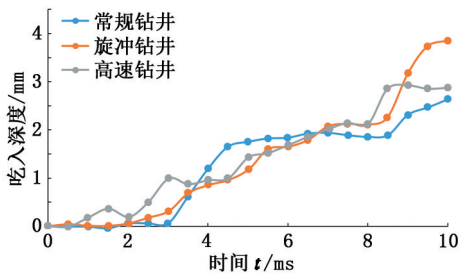


图 10 不同工况下牙齿吃入深度

Fig. 10 Depth of PDC penetrating rock under different working conditions

传统旋转冲击钻井受到地面设备和井下工具的限制,转速一般在 60 ~ 120 r/min,冲击器的冲击频率一般为 15 ~ 20 Hz,而自激振荡式旋转冲击钻井工具由于采用了自激振荡式水力元件冲击频率为 500 Hz 以上,为了避免对井底岩石的重复冲击,最大限度提高破岩效率,要求同时提高转速。因此自激振荡式旋转冲击钻井工具与螺杆钻具联合使用是相辅相成的,是对单独使用螺杆钻具与自激振荡式旋转冲击钻井工具的强化升级。

表 2 试验井 TH10435H 与邻井 TH10417X 机械钻速对比

Table 2 Comparison of ROP between experimental well TH10435H and adjacent well TH10417X

	井号	井段/m	纯钻时间/h	机械钻速/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	机械钻速提高率/%
实验井	TH10435H	1 804 ~ 5 006	141.5	22.63	90.5
对比井	TH10417X	1 804 ~ 4 994	268.5	11.88	
实验井	TH10435H	5 006 ~ 5 142	32.0	4.24	24.3
对比井	TH10417X	4 994 ~ 5 124	42.6	3.05	
实验井	TH10435H	5 142 ~ 6 047	236.2	3.83	44.4
对比井	TH10417X	5 124 ~ 6 047	348.3	2.65	

4.2 TH12272 井

TH12272 井钻进至白垩系下统亚格列木组井深 5 172 m 时,下入自激振荡式旋转冲击钻井工具,并钻至完钻井深 6 318 m,共使用一套工具,纯钻时间 167.48 h,进尺 1 146 m,平均机械钻速 6.84 m/h,钻具组合: $\Phi 250.88 \text{ mm PDC} + \Phi 203 \text{ mm ZJXC} + \Phi 197 \text{ mm PDM} + \Phi 203.2 \text{ mm DC} + \Phi 248 \text{ mm STB} + \Phi 203 \text{ mm DC} +$

4 现场验证

自激振荡式旋转冲击工具(ZJXC)与螺杆钻具(PDM)联合使用作为一种新的思路在塔河油田 10 区和 12 区由中石化华北石油工程公司承钻的 TH10435H 井和 TH12272 井进行了现场试验。

4.1 TH10435 井

TH10435H 井使用两套自激振荡式旋转冲击钻井工具,分别入井 2 次,钻进井段为 1 804 ~ 6 047 m,总纯钻时间为 260.6 h,平均机械钻速 16.3 m/s。钻具组合: $\Phi 250.88 \text{ mm PDC} + \Phi 203 \text{ mm ZJXC} + \Phi 197 \text{ mm PDM} + \Phi 203.2 \text{ mm DC} + \Phi 248 \text{ mm STB} + \Phi 177.8 \text{ mm DC} + \Phi 127 \text{ mm HWDP} + \text{XO}(411 \times 520) + \Phi 139.7 \text{ mm DP}$ 。钻井参数:钻压 40 ~ 100 kN,转速 50 ~ 60 r/min,排量 31 ~ 32 L/s,泵压 21 ~ 22 MPa,钻井液密度 1.29 ~ 1.30 g/cm³。表 2 为 TH10435H 井与附近地层相同使用钻井参数相近的邻井单独使用螺杆钻具的机械钻速对比,可以看出试验 2 井最高提速达 90.5%,平均提速效果达 60.9%。

$\Phi 177.8 \text{ mm NDC} + \Phi 177.8 \text{ mm DC} + \Phi 165.1 \text{ mm DC} + \Phi 127 \text{ mm HWDP} + \text{XO}(411 \times 520) + \Phi 139.7 \text{ mm DP}$ 。表 3 给出了实验井 TH12272 井与附近地层相同使用钻井参数相近的邻井相同井段单独使用螺杆钻具的机械钻速对比数据,实验结果表明,高速旋冲作业井 TH12272 相对单独使用螺杆钻进的邻井 TH12266 和 TH12256,平均提速效果分别为 35.51% 和 45%。

表 3 实验井 TH12272 与邻井 TH12266、TH12256 机械钻速对比

Table 3 Comparison of ROP between experimental well TH12272 and adjacent well TH12266 and TH12256

地层分层	TH12266 井		TH12256 井		实验井 TH12272		
	机械钻速/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	机械钻速 提高率/%	机械钻速/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	机械钻速 提高率/%	段长/ m	底界井深/ m	机械钻速/ ($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)
K ₁ y	9.06	140.00	10.71	103.00	65	5 201	21.75
J ₁	4.59	294.83	7.43	144.13	100	5 301	18.13
T ₃ h	7.31	-10.12	4.14	58.71	155	5 456	6.57
T ₂ a	11.03	36.68	4.63	225.92	190	5 646	15.08
T ₁ k	3.51	262.64	4.64	174.52	65	5 711	12.74
C ₁ kl	3.71	50.31	3.29	69.49	227	5 938	5.58
C ₁ b	3.02	355.94	3.04	351.96	300	6 238	13.76
D ₃ d	3.87	-0.95	4.00	-4.25	78	6 316	3.83

5 结 论

(1) 旋转冲击钻井中,在其他条件相同的情况下,增大钻头的转速,钻头吃入地层深度减少,前进阻力增大且波动更为剧烈,岩石破碎效率提高。

(2) 增大钻头上的冲击力幅值可有效增加钻头吃入地层的深度,提高岩石破碎效率;增大钻头上冲击力频率,钻头输入能量增加,有效提高了破岩体积。

(3) 螺杆钻具结合自激振荡式高速旋转冲击钻井工具形成的自激振荡式高速旋转冲击钻井技术相比于自激振荡式旋转冲击钻井技术提高了钻头转速;相对于单独螺杆钻进,提高了切削齿的吃深。高速旋转钻进相比单独使用螺杆钻具提速效果明显,试验井相对于邻井单螺杆钻井,提速比例分别为60.9%、35.51%和45%。

参考文献:

- [1] 菅志军,张文华,刘国辉,等. 石油钻井用液动冲击器研究现状及发展趋势[J]. 石油机械,2001,29(11):43-46,62.
JIAN Zhijun, ZHANG Wenhua, LIU Guohui, et al. Current status and developing trend of research on hydraulic hole hammer for oil drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2011,29(11):43-46,62.
- [2] 刘天科. 自激振荡式旋转冲击钻井工具在胜利油田的应用[J]. 石油钻采工艺,2012,34(4):54-56.
LIU Tianke. Application of self-oscillating rotary percussion drilling tools in Shengli Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012,34(4):54-56.
- [3] 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 Banshen19-64 in Dagang Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology,2012,34(6):114-116.
- [4] 许京国,尤军,陶瑞东,等. 自激振荡式旋转冲击钻井工具在大港油田的应用[J]. 钻采工艺,2013,36(3):124-125,128.
XU Jingguo, YOU Jun, TAO Ruidong, et al. Application of self-excited oscillation drilling tools in Dagang Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013,36(3):124-125,128.

- [5] 雷鹏,倪红坚,王瑞和,等. 自激振荡式旋冲工具在深井超深井中的试验应用[J]. 石油钻探技术,2013,41(6):40-43.
LEI Peng, NI Hongjian, WANG Ruihe, et al. Field test of self-excited vibration rotary percussion drilling tool in deep and ultra-deep wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(6):40-43.
- [6] SAKSALA T, FOURMEAU M, KANE P A, et al. 3D finite elements modelling of percussive rock drilling: estimation of rate of penetration based on multiple impact simulations with a commercial drill bit[J]. Computers & Geotechnics, 2018,99:55-63.
- [7] KONG X, FANG Q, WU H, et al. Numerical predictions of cratering and scabbing in concrete slabs subjected to projectile impact using a modified version of HJC material model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016,95:61-71.
- [8] 巫绪涛,李耀,李和平. 混凝土 HJC 本构模型参数的研究[J]. 应用力学学报,2010,27(2):340-344,443.
WU Xutao, LI Yao, LI Heping. Research on the material constants of the HJC dynamic constitutive model for concrete[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2010,27(2):340-344,443.
- [9] 李耀,李和平,巫绪涛. 混凝土 HJC 动态本构模型的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2009,32(8):1244-1248.
LI Yao, LI Heping, WU Xutao. Research on the HJC dynamic constitutive model for concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology,2009,32(8):1244-1248.
- [10] 马清明,王瑞和. PDC 切削齿破岩受力的试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(2):45-47.
MA Qingming, WANG Ruihe. Experimental study on force of PDC cutter breaking rock[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(2):45-47.
- [11] 邹德永,王瑞和. 刀翼式 PDC 钻头的侧向力平衡设计[J]. 石油大学学报(自然科学版),2005,29(2):42-44.
ZOU Deyong, WANG Ruihe. Lateral force balancing design of blade PDC bits[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005,29(2):42-44.

(编辑 刘为清)