

基于转动定律的钻头轮头速比仿真模型

蒋海军¹, 况雨春², 钱雯², 赵楠²

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 西南石油大学机电工程学院, 四川成都 610500)

摘要:在牙轮钻头的破岩过程中,影响牙轮转速的因素非常复杂,因此,研究牙轮钻头的轮头速比对岩石破碎机理研究和钻头设计都有重要的指导作用。总结了国内外以力矩平衡、最小功原理等为代表的几种牙轮钻头轮头速比模型的建模理论及其优缺点。通过分析台架试验数据,发现影响轮头速比的主要因素是外齿圈和次外齿圈的齿数、每颗触底齿与岩石的相互作用力、钻压及岩石的硬度。在此基础上,假设牙轮是对称结构、牙轮轴心线为牙轮中心惯性主轴,考虑影响轮头速比的钻头结构参数、钻压和岩石硬度等主要因素,建立了一种基于转动定律的牙轮钻头轮头速比仿真模型。采用数学回归方法对台架试验数据进行处理,求得了所建仿真模型的相关系数。对比分析发现,所建仿真模型的计算结果与台架实物试验结果相对误差较小,说明所建仿真模型可以用来计算实际钻头或仿真钻头的轮头速比,为牙轮钻头破岩机理分析和建立钻进仿真模型奠定了基础。

关键词:牙轮钻头 轮头速比 转动定律 钻井参数 仿真模型

中图分类号:TE21 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2012)02-0035-06

A New Simulation Model about Ratio of Velocity between Cone and Bit Based on Law of Rotation

Jiang Haijun¹, Kuang Yuchun², Qian Wen², Zhao Nan²

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: The factors affecting the rotation speed of cone are very complex during the drilling, therefore, the study about ratio of velocity between cone and bit plays an important guiding role to the rock breaking mechanism and bit design. The modeling theory of ratio of velocity between cone and bit such as torque balance and minimum work, and its advantage and disadvantage have been summed up in this paper. Based on the analysis of staging testing results, the main factors affecting the ratio of velocity between cone and bit include: structural parameters of bit, weight on bit (WOB) and rock hardness. Based on the above research, it is assumed that the cone structure is symmetrical and the cone axis is the central major axis of inertia. Under the assumption, a new simulation model about ratio of velocity between cone and bit based on law of rotation has been created, taking into account the main factors such as the structural parameters of the bit, WOB, and rock hardness. By using mathematical regression method for processing the test result, the correlation coefficient of the simulation model built has been obtained. Based on comparative analysis, the result has been achieved that the error between the calculation result of simulation model and the actual test result is small. So, the built simulation model can be used to calculate the ratio of velocity between cone and bit and to lay a foundation for the analysis of cone bit rock breaking mechanism and the establishment of a drilling simulation model.

Key words: cone bit; ratio of velocity between cone and bit; law of rotation; drilling parameters; simulation model

1 国内外轮头速比研究概况

钻头是破岩的重要工具,关系到钻井速度的快慢和建井周期的长短。在牙轮钻头破岩过程中,通常定义牙轮自转与钻头绕轴线公转的转速之比为轮

收稿日期:2011-12-02;改回日期:2012-02-17。

作者简介:蒋海军(1972—),男,四川绵阳人,1994年毕业于西南石油学院石油工程专业,1997年获西南石油学院油气井工程专业硕士学位,2000年获石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,主要从事石油工程技术研究工作。

联系方式:(010)84988081,jianghj.sripe@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“单次冲击加载后岩石全应力-应变本构特性及应用研究”(编号:51174273)部分研究内容。

头速比 i 。轮头速比是进行钻头破岩机理分析、指导牙轮钻头设计的重要参数。牙轮钻头属于冲击压碎型井下破岩工具。钻头的切削齿在钻压和扭矩的作用下交替接触井底,产生动压力和冲击力,进而破碎岩石^[1]。牙轮钻头的钻进效率和磨损受其切削结构和其与岩石间的相互作用影响,在破碎岩石的过程中,切削结构的滑移程度又受到轮头速比的限制。因此,研究计算牙轮钻头的轮头速比并将其应用于牙轮钻头钻进仿真,对提高钻头使用寿命、机械钻速和优化钻头设计具有重要的意义。

目前国内外该方面的研究主要从两方面展开:一方面通过试验得出各因素对轮头速比的影响规律,并根据实测数据求出平均轮头速比的经验值或范围;另一方面通过仿真模拟来研究轮头速比,如利用最小功原理、动力矩平衡等来计算轮头速比,还可以从动力学角度出发来推算轮头速比。不过,无论研究的出发点如何,都是基于三牙轮钻头的几何模型和运动学模型^[2]。

国外有关轮头速比的研究 把牙轮简化为无移轴、各齿圈无超顶的圆锥,求牙轮纯滚动时的轮头速比。荷兰学者 E. I. Eronini 假设牙轮转速仅由牙轮外排齿确定,用链轮传动模型求解轮头速比^[3]。原苏联 C. B. 拉萨诺夫也做过类似的分析,但是链轮传动模型过于简化,不符合牙轮运动实际情况。Ana-drill 和 Schlumberger 公司技术人员在钻头及牙轮无惯性、牙轮与其轴承间无摩擦的假设下,用牙轮力矩平衡方程求解牙轮转速^[4],但该方法对牙齿受力依赖性大,不同的受力得出的轮头速比相差很大,因此该方法计算结果的准确性还值得商榷。俄罗斯学者 Palashchenko 假设轮头速比主要由牙轮的最外排齿圈决定,根据牙轮最外排齿距与齿坑距间的关系,推导出轮头速比的计算模型^[5-6],该模型充分考虑了井底形貌对轮头速比的影响,对牙轮钻头设计具有一定指导作用。

国内的轮头速比计算模型的发展概况 赵淑兰等人^[7]利用正交试验法分析试验数据,得到各种影响因素的变化趋势,并在单齿圈纯滚动的轮头速比模型基础上,考虑每颗齿的滑移、多齿圈、移轴距的影响,建立了轮头速比计算模型,但模型中未涉及钻压和岩石性质等因素对轮头速比的影响。马德坤等人^[8]采用离散仿真的方法,将时间离散成很小的时间区间 Δt ,由动量矩定理推导出牙轮的动力学基本方程,再联立钻头几何学方程、运动学方程以及牙轮的角加速度、角速度、扭矩仿真方程,编制单牙轮单

齿圈轮头速比的仿真程序,计算牙轮的近似瞬时角速度,该方法需要计算牙齿与岩石间在每一个时间区间 Δt 内的相互作用力的大小,仿真计算过程很复杂。根据最小功原理^[9]相关理论可知,钻头的轮头速比应该是牙轮转动时耗功最小状态下的轮头速比,以 Δt 为单位时间,根据 i 的经验值取一个等差数列 i_n ,逐个计算某牙轮在一较长时间段内所有牙齿与岩石之间相互作用的功 W_n ,那么最小 W_n 所对应的就是牙轮的轮头速比 i_n 。总的来说,目前还缺少一定的实测数据作为依据来验证和修正仿真模型。

2 轮头速比试验研究

西南石油大学钻头研究所应用试验钻头在模拟钻井工况下对岩样进行钻进,直接测试牙轮钻头的轮头速比,通过分析大量的试验数据,归纳总结各因素对轮头速比的影响规律。试验装置如图 1 所示。试验中,岩样做定轴转动,钻头沿轴线作纵向移动,从而实现钻头与岩样间的相对运动。通过质量块施加钻压,由牙轮转速仪测定牙轮转速 ω_t 和转盘转速(即钻头转速 ω_b),轮头速比则可由下式(1)求出:

$$i = \frac{\omega_t}{\omega_b} \quad (1)$$

式中: i 为轮头速比; ω_t 为牙轮转速, r/min; ω_b 为钻头转速, r/min。

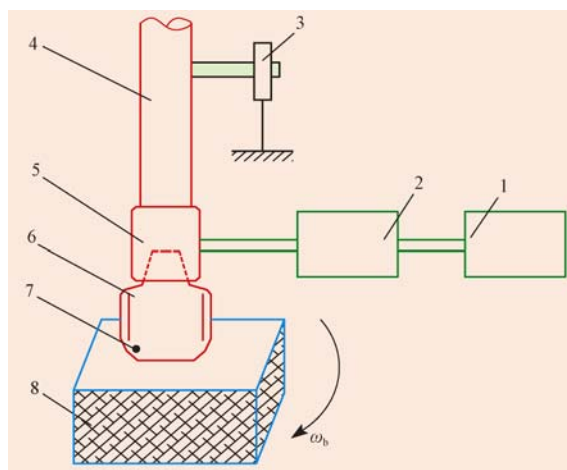


图 1 钻头钻进室内试验原理

Fig. 1 Schematic diagram of the drilling experiment in lab
1. 计算机; 2. 应变仪; 3. 位移传感器; 4. 钻杆; 5. 钻压、扭矩测量接头; 6. 钻头; 7. 牙轮转速感应器; 8. 岩石

牙轮钻头在破岩时,其牙轮的运动形式受诸多因素的影响且关系错综复杂,如钻头结构、岩石性质、岩石表面齿坑分布、钻柱的纵向振动和扭转振

动、井眼形状、摩阻以及钻头周围的水力因素等。这些因素有些是相互独立的,有些本身就是随机的。由于影响因素之多,采用正交试验方法计算轮头速比不仅困难,而且某些因素目前还很难准确掌握。

2.1 牙轮钻头布齿参数对轮头速比的影响

表 1 为 5 种牙轮钻头的部分布齿参数及其几何参数对轮头速比影响的试验结果。由表 1 可看出,外圈齿数和次外圈齿数对 i 有显著的影响,总的趋势是 i 随齿数减少而减小。副锥会导致同一牙轮上

的不同齿圈滚动的角速度不同,这是因为各齿圈发生的滑移程度不同,并且总是存在一个齿圈的旋转角速度与牙轮纯滚动时的轮头速比最为接近,称该齿圈为“主动齿圈”^[7],它对牙轮转速的影响相较于其他齿圈最为明显。另外,相关文献表明,超顶距对牙轮转速的影响原理与副锥相似^[10]。齿圈位置对 i 也会产生影响,当牙轮外形一定时,随着主锥上的两排齿圈向副锥靠近(同时齿圈齿顶直径增大),内齿圈成为“主齿圈”的概率增大,轮头速比 i 下降。

表 1 布齿参数与轮头速比的关系

Table 1 Relationship between teeth arrangement and ratio of velocity between cone and bit

钻头 型号	布齿 方式	齿顶到牙轮轴线距离/mm		齿数		i
		最外圈	次外圈	最外圈	次外圈	
HA437	I	65.724	51.654	16	9	1.35
	II	65.724	60.763	13	11	1.12
	III	65.724	65.112	10	10	1.41
HJ437	I	63.550	65.366	9	9	1.44
	II	63.550	57.262	15	11	1.29
	III	63.550	63.462	11	11	1.29
JD437	I	67.450	53.160	15	9	1.35
	II	67.450	61.270	13	11	1.18
	III	67.450	66.000	9	9	1.40
HA537	I	64.160	61.380	19	15	1.41
	II	64.160	63.400	14	14	1.43
	III	64.160	64.110	11	11	1.37
HA637	I	64.950	61.000	21	17	1.47
	II	64.950	63.610	17	17	1.39
	III	64.950	64.830	13	13	1.36

牙轮的移轴距使牙齿在井底的旋转半径增大,根据轮头速比的近似计算式 $i_0 = \frac{L_0}{r_0}$ ^[11] 可知,单个齿圈在纯滚动时的轮头速比也相应增大(式中: r_0 表示齿顶与岩石接触的齿宽范围内,相对滑动速度为 0 的点到牙轮轴线的距离; L_0 表示滑动速度为 0 的点到钻头轴线的距离),所以随着移轴距的增大,钻头的轮头速比增大。然而在大部分牙轮钻头的制造或生产过程中,移轴、超顶和副锥现象是普遍存在的,由于试验中缺乏移轴、超顶、副锥钻头的实钻数据,笔者通过几何解析来分析这些因素对轮头速比的影响规律。

三牙轮的各齿圈间破碎带是否相同将直接决定岩石表面齿坑的形貌。图 2 为 437 型牙轮钻头,该钻头三个牙轮外圈齿的破碎带相同,而次外圈齿的破碎带各不相同。岩石对牙齿的作用力是牙轮滚动的动力,该力的大小和方向决定了牙轮转速的快慢,

但牙齿与岩石相互作用力的情况十分复杂。若三个牙轮破碎带不同,则牙轮转动时受齿坑形貌的影响相互独立;若牙轮间有破碎带重合,那么任一个牙轮将通过齿坑形貌对另两个牙轮的运动产生干涉。在布齿结构上,可以采用不等距布齿,以确保牙轮各齿在井底轨迹不出现重复(即不落入别的齿已破碎的旧坑内),并尽可能增加布齿密度^[12]。



图 2 437 型牙轮钻头

Fig. 2 Tri-cone bit of Model 437

井底岩石表面形貌对牙轮的转速也有一定的影响。首先,由于岩石表面各破碎环上分布不同的齿坑数目,齿坑的形貌是随机变化的。牙齿触底时正好落在旧齿坑正中心的概率是很难计算的,当牙齿落在齿坑壁上时,在钻压、岩石摩擦力和牙轮绕钻头轴线旋转力的共同作用下,牙齿有向齿坑底滑移的趋势,导致牙轮转速发生变化。有时,牙轮钻头根本无法使岩石直接产生体积破碎,只能使岩石表面破碎,或在多次重复作用下才产生体积破碎,这不仅降低了机械钻速^[13],对轮头速比也有一定影响。图3反映了牙轮处于转动加速或者减速时,触底齿的受力分析。图3左侧为牙轮转动减速的情形,右侧为加速情形, P 为分配在每颗触底齿上的钻压, F_{r1} 为牙轮带动触底齿绕钻头轴线转动的力, F_s 为滑动力, F_2 是 F_{r1} 和 F_s 的合力。在图3中,若岩石抗压强度较大,而牙轮自转扭矩较小时,滚动力减小,则合力 F_2 相应减小,此时,如果 F_2 不足以破碎齿坑间突起,那么触底齿将沿 AA' 向齿坑底滑移,牙轮转速将增大;当岩石抗压强度较小,且牙轮自转扭矩较大时,由于滚动力 F_{r1} 增大,合力 F_2 相应增大,此时齿坑间突起发生岩石破碎,而牙齿将沿着 AA'' 方向滑动,牙轮转速将减小。

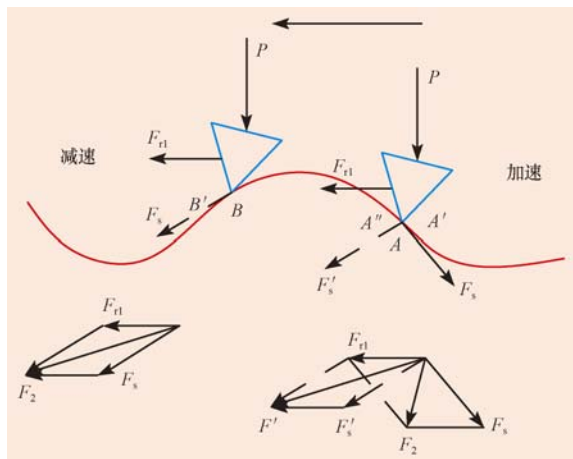


图3 牙齿滑移对牙轮转速的影响

Fig. 3 Effect of tooth sliding on cone rotation

2.2 钻井参数对轮头速比的影响

表2为不同型号钻头钻井参数对轮头速比的影响试验结果。从表2中HA537型和HA637型钻头的试验结果可看出,钻头转速对各牙轮的传动比基本上不产生影响。此外,从表2中JD437型钻头在不同钻压、转速下钻砂岩时的试验结果可看出,轮头速比随钻压的增大、岩石硬度的减小而增大,当钻

压增大到一定程度后,轮头速比趋于稳定。事实上,岩石硬度对轮头速比的影响与钻压对轮头速比的影响有类似之处;岩石硬度减小,在相同钻压下牙齿的吃入深度增大,相当于在同一种岩石上增大钻压,轮头速比理应呈现减小的规律^[14]。

表2 钻井参数与轮头速比的关系

Table 2 Relationship between drilling parameter and ratio of velocity between cone and bit

钻头型号	试验序号	钻压/kN	转速/ (r·min ⁻¹)	i	岩样类型
JD437	1	40.000	62.700	1.31	砂岩
	2	80.300	61.800	1.38	
	3	40.400	141.600	1.33	
	4	80.700	142.900	1.37	
HA537	1	99.880	62.319	1.42	砂岩
	2	152.154	62.461	1.40	
	3	147.973	62.455	1.37	花岗岩
HA637	1	147.688	61.980	1.41	砂岩
	2	147.205	61.737	1.24	花岗岩
	3	198.33	62.393	1.48	

3 轮头速比仿真模型的建立

通过以上分析,可以发现在影响轮头速比的诸多因素中,以下3项因素的影响程度最为显著:1)外齿圈和第二齿圈齿数对轮头速比有显著的影响,总的趋势是轮头速比随齿数减少而减小;2)每颗触底齿与岩石的相互作用力是牙轮自转的动力;3)轮头速比随钻压的增大、岩石硬度的减小而增大。

由此,笔者假设牙轮是对称结构,牙轮轴心线为牙轮中心惯性主轴。根据轮头速比的定义可知,钻头每转一周,牙轮绕轴颈转过了 i 周。

由于牙轮所受力的大小和方向是决定牙轮转速的根本因素,通过产生合外力矩影响牙轮的转速。理论力学中刚体定轴转动的转动定律是:刚体定轴转动时,刚体的角速度与作用于其上的合外力矩成正比,与刚体的转动惯量成反比,其公式形式为 $M=J\alpha$ 。转动定律公式等号两边同时对时间 t 积分得:

$$Mt = J\omega \quad (2)$$

将式(1)、式(2)联立,得到第 I 牙轮的轮头速比:

$$i_I = \frac{\omega_c}{\omega_b} = \frac{M_c t_c J_b}{M_b t_b J_c} \frac{\left[M_{cI} - M_{fI} - C_{cI} \frac{d\varphi_I}{dt} \right] t_{cI} J_b}{M_b t_b J_c}$$

$$= \frac{J_b}{J_c} \frac{\sum_{j=1}^{N(D)} \sum_{k=1}^{N(I,j)} (M_{Ijk} - M_{I1}) t_{Ijk}}{M_b t_b} \quad (3)$$

式中: M_{c1} , M_b 分别为第 I 齿轮、钻头所受的合外力矩, $N \cdot m$; J_{c1} , J_b 分别为第 I 齿轮、钻头的转动惯量, $kg \cdot m^2$; M_{Ijk} 为第 I 齿轮第 j 齿圈上第 k 颗齿所受外力对齿轮产生的力矩, $N \cdot m$; M_{I1} 为第 I 齿轮与轴承间的摩擦扭矩, $N \cdot m$; C_{c1} 为齿轮旋转运动阻尼系数, $N \cdot s/m$; $N(D)$, $N(I, j)$ 分别为第 I 齿轮的齿圈数及 I 齿轮 j 齿圈上的齿数; t_{Ijk} 为第 I 齿轮第 j 齿圈上第 k 颗齿触底造坑的时间, s。

轴承阻力矩及钻井液对钻头和齿轮运动的影响与其他因素相比小得多, 为了简化模型, 忽略这两种因素, 式(3)可简化为:

$$i_I = \frac{J_b}{J_c} \frac{\sum_{j=1}^{N(D)} \sum_{k=1}^{N(I,j)} M_{Ijk} t_{Ijk}}{M_b t_b} \quad (4)$$

注意: 式中 t_{Ijk} 经过 2 次累加后并不等于 t_b , 因为 t_b 是钻头的整个破岩时间, 而 t_{Ijk} 一个牙齿的触底时间, 所以 t_b 比 $\sum \sum t_{Ijk}$ 多了触底齿间过渡的时间。

准确掌握牙齿受力的大小及方向较为困难, 但是从现有的研究结论来看, 某一齿圈的力矩之和与该齿圈上的齿数和齿圈直径有关。显然, 齿数越多, 受到的平均力矩越大; 齿圈直径越大, 产生力矩的力臂越大。因此, 可用某齿圈上齿数 K_{Ij} 与该齿圈半径 r_{Ij} 的乘积来衡量该齿圈所受力矩的大小。整理式(4)得:

$$i_I = \frac{J_b}{\psi J_c} \frac{\sum_{j=1}^{N(D)} \sum_{k=1}^{N(I,j)} M_{Ijk}}{M_b} = \frac{J_b}{\psi J_c} \frac{\sum_{j=1}^{N(D)} \sum_{k=1}^{N(I,j)} (K_{Ij} r_{Ij})^{\theta(j)}}{M_b} \\ = \frac{J_b}{\psi J_c M_b} [(K_{I1} r_{I1})^{\theta(1)} + (K_{I2} r_{I2})^{\theta(2)} + \dots + (K_{I5} r_{I5})^{\theta(5)}] \quad (5)$$

式(5)仅从钻头自身出发, 考虑了力矩对齿轮转速的影响。从总体上看, 齿轮的运动特征还受到钻井参数的干扰。考虑钻压 P_z 和岩石抗压强度 σ 的影响, 并代入式(5), 则轮头速比的最终计算模型为:

$$i_I = \frac{J_b}{\psi J_c M_b} \left[\sum_{j=1}^{N(D)} \sum_{k=1}^{N(I,j)} (K_{Ij} r_{Ij})^{\theta(j)} \right] P_z^\beta \sigma^\gamma \\ = [\zeta(1)(K_{I1} r_{I1})^{\theta(1)} + \zeta(2)(K_{I2} r_{I2})^{\theta(2)} + \dots + \zeta(5)(K_{I5} r_{I5})^{\theta(5)}] P_z^\beta \sigma^\gamma \quad (6)$$

式中: P_z 为钻进钻压, kN; σ 为岩石抗压强度, MPa; $\theta(j)$, β , ψ 为系数, 根据各因素对轮头速比的影响规律可知, 各系数 θ 和 β 应大于 0, ψ 应小于 0。

4 MATLAB 仿真结果

笔者以 5 种钻头分别钻进砂岩和花岗岩岩样时各齿轮的平均轮头速比做为样体, 并基于式(6)利用多元线性回归方法编制了拟合程序, 分别对 5 种钻头钻进 2 种岩样的轮头速比进行了拟合计算, 选取轮头速比误差最小的一组求出的系数作为式(6)的未知参数; 再将所得参数代回模型, 计算了 2 只钻头各齿轮在各工况下轮头速比, 结果见表 3。

表 3 轮头速比试验结果与拟合结果对比

Table 3 Correlation between test result and calculated result for ratio of velocity between cone and bit

钻头型号	试验序号	轮头速比					
		试验			计算		
		齿轮 I	齿轮 II	齿轮 III	齿轮 I	齿轮 II	齿轮 III
HA437	1	1.350	1.120	1.410	1.360	1.190	1.370
	2	1.420	1.230	1.440	1.420	1.250	1.430
	3	1.360	1.120	1.410	1.360	1.190	1.370
	4	1.410	1.250	1.430	1.420	1.250	1.430
HA537	1	1.462	1.475	1.319	1.420	1.430	1.380
	2	1.414	1.430	1.370	1.460	1.470	1.410
	3	1.380	1.394	1.350	1.390	1.400	1.350

通过计算表 3 中 2 只钻头、6 个齿轮 7 组试验中轮头速比与计算轮头速比的相对误差, 发现试验轮头速比与计算轮头速比的平均相对误差为 2.04%。

这说明轮头速比的试验值与计算值之间的误差较小, 可以应用该模型来估算实际钻头或仿真模拟中钻头的轮头速比。

5 结 论

1) 综合考虑影响轮头速比的主要因素,基于转动定律建立了轮头速比计算模型的基本形式,利用试验结果,求解了相关系数,确定了模型的定量关系。

2) 所建立的轮头速比计算模型避免了繁杂的牙齿受力计算,与以前的轮头速比计算模型相比,无论形式上还是计算操作上都更为简便。

3) 所建立的轮头速比计算模型能较准确反映轮头速比变化规律,且误差不大,可为牙轮钻头数字化钻进仿真模型的完善奠定基础,为牙轮钻头破岩机理分析及钻头优化设计提供一定的理论依据。

4) 由于影响传动比因素间的关系错综复杂,且相互影响,加之笔者仅考虑了钻压、岩石强度及主要布齿参数的影响。因此,所建轮头速比模型还需作进一步的深化研究,并在钻头设计中进行应用及验证。

参 考 文 献

References

- [1] 高子佩. 调整井刮刀钻头与牙轮钻头使用特性对比分析[J]. 石油钻探技术, 1997, 25(4): 31-32, 42.
Gao Zipei. Comparative analyses of working performances between drag bits and roller bits used in adjustment wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1997, 24(4): 31-32, 42.
- [2] 马德坤. 牙轮钻头工作力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 14-126.
Ma Dekun. The operational mechanics of the rock bit[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 14-126.
- [3] Umez-Eronini E I. Rotary drill bit/rock model with cutter offset[J]. Journal of Energy Resource Technology, 1983, 105(3): 356-361.
- [4] Sheppard M C, Lesage M. The forces at the teeth of a drilling roller cone bit—theory and experiment[R]. SPE 18042, 1988.
- [5] Palashchenko Y A. Classic bit kinematics 1: design analysis predicts cone behavior[J]. Oil and Gas Journal, 2008, 106(5): 46-54.
- [6] Palashchenko Y A. Classic bit kinematics 2: true kinematics opens way to bit improvement[J]. Oil and Gas Journal, 2008, 106(6): 42-47.
- [7] 张强, 张晓东, 马德坤, 等. 齿圈组合对牙轮钻头传动比的影响[J]. 石油矿场机械, 1997, 26(4): 1-4.
Zhang Qiang, Zhang Xiaodong, Ma Dekun, et al. How does row combination influence the cone ratio[J]. Oil Field Equipment, 1997, 26(4): 1-4.
- [8] 赵淑兰, 马德坤. 单齿圈牙轮钻头轮体速比的计算机仿真[J]. 石油机械, 1998, 26(7): 13-16.
Zhao Shulan, Ma Dekun. Computer simulation of cone/bit speed ratio of single tooth row bits[J]. China Petroleum Machinery, 1998, 26(7): 13-16.
- [9] 马德坤, 周德胜. 牙轮钻头轮体速比的计算机仿真[J]. 石油机械, 1995, 23(3): 18-21.
Ma Dekun, Zhou Desheng. Computer simulation of cone/bit speed ratio [J]. China Petroleum Machinery, 1995, 23(3): 18-21.
- [10] 刘世华, 赵海宏. 牙轮钻头超顶的运动分析[J]. 石油机械, 2001, 29(7): 15-16.
Liu Shihua, Zhao Haihong. Motion analysis of bit with cone overhung[J]. China Petroleum Machinery, 2001, 29(7): 15-16.
- [11] 张强. 牙轮钻头传动比的计算模型[J]. 石油机械, 1997, 25(10): 9-12.
Zhang Qiang. Model for calculating drive ratio of cone bit[J]. China Petroleum Machinery, 1997, 25(10): 9-12.
- [12] 王克雄, 夏宏南, 翟应虎, 等. $\phi 444.5$ mm 牙轮钻头的改型设计[J]. 石油钻探技术, 1996, 24(2): 39-40, 43.
Wang Kexiong, Xia Hongnan, Zhai Yinghu, et al. The modification design of $\phi 444.5$ mm roller bit[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1996, 24(2): 39-40, 43.
- [13] 陈敏, 吕建国, 刘宝林, 等. 直井牙轮钻头碎岩功率研究[J]. 石油钻探技术, 2005, 34(2): 48-50.
Chen Min, Lv Jianguo, Liu Baolin, et al. Study on roller bit rock-breaking power in vertical wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 34(2): 48-50.
- [14] 张强, 周鹤法, 马德坤, 等. 三牙轮钻头传动比的测试实验及分析[J]. 石油矿场机械, 1996, 25(6): 22-26.
Zhang Qiang, Zhou Hefa, Ma Dekun, et al. Lab test and analysis about cone bit ratio[J]. Oil Field Equipment, 1996, 25(6): 22-26.

贝克休斯公司 Kymera 混合型钻头

最近, 贝克休斯公司发明了一种适用于夹互层地层的 Kymera 混合型钻头。该钻头集成牙轮钻头与 PDC 钻头的特点, 具有双重切削结构旋转力矩管理系统、Premium Quantec™ 和 Quantec Force™ 牙轮、独特的滚锥轴承与密封包。

与牙轮钻头相比, Kymera 混合型钻头钻压降低, 轴向振动减弱, 跳钻问题减轻, 机械钻速增加; 与 PDC 钻头相比, 其钻矩更低、更稳定, 扭转振动减弱, 粘滑问题减轻, 方向控制更精准、稳定, 在钻进多夹层地层时可实现精准的方向控制和平稳的扭矩控制, 减少了复杂地层的钻井时间。目前, Kymera 钻头已经在 6 个国家使用了 100 多次, 钻深超过了 30 480 m。

[高元 供稿]