

新型凹状曲面金刚石复合片切削具的参数计算和分析

汤凤林^{1,2}, 赵荣欣¹, Нескоромных В.В.³, 李 博¹, 周 欣⁴, 段隆臣²

(1.上海市建筑科学研究院有限公司,上海 200032; 2.中国地质大学(武汉)工程学院,湖北 武汉 430074;
3.Сибирский Федеративный университет, г.Красноярск Россия 660095; 4.湖北省地震局,湖北 武汉 430064)

摘要: PDC钻头在石油天然气钻井和地质勘探钻进中得到了广泛的应用,但是,钻井中钻具的振动及其引起的PDC非正常磨损,影响了这种先进方法的技术经济效果。国内外钻探工作者提出使用楔形和圆柱形切削具,对于防止振动及其非正常磨损、提高钻探技术经济指标起了一定的作用,但未根本解决。俄罗斯专家提出使用凹状曲面PDC切削具,经过理论计算和分析对比,对其进行了计算机模拟,给出了有关参数(凹状曲面圆锥顶角,安装前角),对于解决PDC振动问题有一定参考价值,值得引起我们的注意。

关键词: PDC钻头;振动;非正常磨损;凹状曲面PDC;凹状曲面圆锥顶角;切削具安装前角

中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)05-0073-08

Parameter calculation and analysis of a novel concave surface PDC cutter

TANG Fenglin^{1,2}, ZHAO Rongxin¹, Neskoromnyh V.V.³, LI Bo¹, ZHOU Xin⁴, DUAN Longchen²

(1.Shanghai Institute of Building Sciences Limited Company, Shanghai 200032, China;

2.Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

3.Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660095, Russia; 4.Hubei Earthquake Agency, Wuhan Hubei 430064, China)

Abstract: PDC bits are widely used in oil and gas drilling, and geological exploration drilling. However, vibrations and abnormal wear of the bits resulting from them compromise the technical and economic effectiveness of the advanced drilling method. The wedge and conic form PDC cutters proposed by both Chinese and foreign specialists have been somehow effective in preventing the vibrations and abnormal wear of drill bits, and increasing the technical and economic indexes; but they can not eliminate the problem completely. Russian scientists have proposed a new type concave PDC cutter, performed computer simulation, and presented related parameters (concave cone angle and rake angle) through theoretical calculation and analytical comparison. The concave PDC cutter can provide some reference for solving the vibrations of PDC bits; thus, it is noteworthy for us to pay attention to.

Key words: PDC bit; vibration; anomaly wear; concave PDC; concave cone angle; rake angle

0 引言

在石油天然气普查勘探钻采工程、地质勘探和其它有关行业中,使用的钻进方法很多。

金刚石钻进是一种比较先进的钻进方法。由于这种方法的钻进效率比较高,钻孔质量比较好,施工劳动强度比较低,因此,得到了越来越广泛的

应用。但是,在金刚石钻进中,钻柱始终处于压缩、旋转和摩擦等的复杂受力状态中,因此产生振动。振动带来的危害很大,主要有:(1)对金刚石造成严重损伤,钻杆振动施于钻头上的冲击力,促使出露的金刚石破碎、脱落、严重磨损(非正常磨损),钻头寿命显著降低,单位进尺金刚石消耗量增加;(2)严

收稿日期:2023-02-15 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.05.011

基金项目:国家自然科学基金面上项目“不同结构高压电脉冲钻头的破岩过程与预测模型研究”(编号:42272366)

第一作者:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院外籍院士、俄罗斯自然科学院外籍院士、国际矿产资源科学院院士,采矿工程专业,主要从事采矿工程方面的教学和科研工作,湖北省武汉市鲁磨路388号,fltang_wuhan@aliyun.com。

引用格式:汤凤林,赵荣欣,Нескоромных В.В.,等.新型凹状曲面金刚石复合片切削具的参数计算和分析[J].钻探工程,2023,50(5):73-80.

TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, Neskoromnyh V.V., et al. Parameter calculation and analysis of a novel concave surface PDC cutter [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 73-80.

重影响岩心采取率及其品质,钻柱振动敲击岩心,使岩心折断、破碎,造成岩心堵塞;(3)设备管材严重磨损,转矩增高,功率消耗增大;(4)钻孔弯曲难以控制,钻进技术经济指标下降,等等。

自从20世纪70年代以来,PDC(聚晶金刚石复合片)钻头在油气田从软到中硬的地层中钻进时逐步取代了金刚石钻头,在油气井钻进中得到了广泛的应用。后来很快发展到地质钻探中来,PDC钻头研究日趋成熟,钻进工艺日益完善,技术经济指标不断提高,引起了地质钻探界的高度重视,并已大量使用^[1-7]。

但是,PDC钻头钻进中产生的振动及其引起的切削具非正常磨损问题,一直没有得到很好的解决,直接影响机械钻速、钻头寿命、钻孔质量和技术经济指标。

1 PDC钻头振动分析

PDC钻头钻进时可能经受各种振动,常见的振动类型有:轴向振动、横向(径向)振动和扭拧振动,见图1^[8]。其中横向振动最为常见。

产生振动的原因很多,诸如钻进规程不稳定、地质剖面不均匀、有水力动力学过程存在、孔底动力作用系统复杂等。如果遇到各向异性岩石或定向斜孔钻进时,则振动会更加剧烈。横向振动可使井筒形

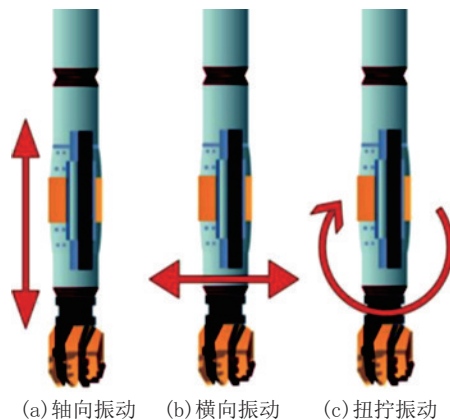


图1 PDC钻头钻进时钻头常见振动类型

Fig.1 Common vibration types of the PDC bit in drilling

状不规则,偏离设计方向,使用孔底遥测系统发生困难,动载荷水平升高,钻具耐磨性降低,钻井质量恶化,钻进规程参数失控,钻头寿命受损,钻井技术经济指标降低等。

俄罗斯南方国立技术大学 A.A. 特列季雅克(A. A. Третьяк)教授利用楔形复合片和圆锥弧形复合片组合设计出来的油气井双层钻头,在解决复合片非正常磨损和振动问题方面取得了一定进展。他们选用了楔形和圆锥弧形PDC复合片(见图2)^[8-10]。

采用楔形复合片时,在钻进过程中,楔形齿与地层接触面积小,受力集中,齿下岩石在较大接触应力的作用下,产生破裂裂纹,因此,比较容易“吃”入岩

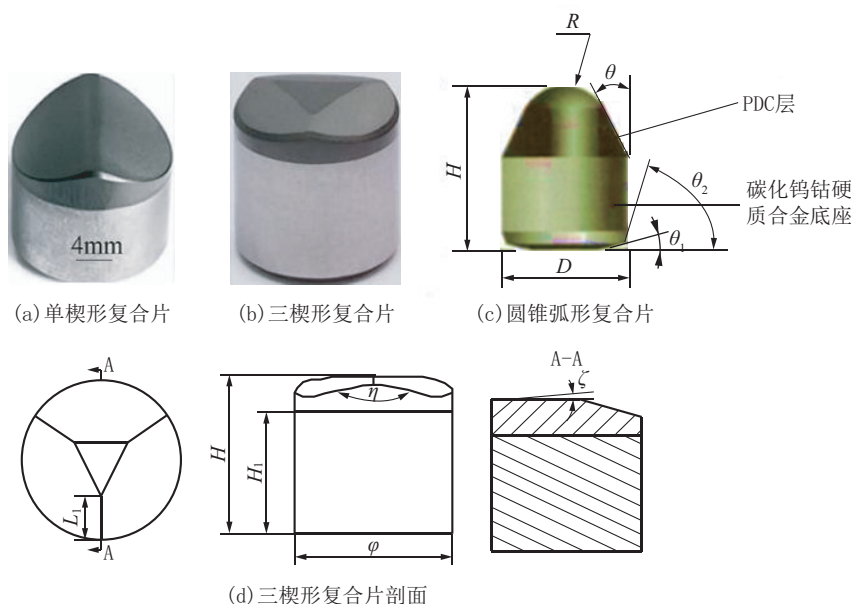


图2 PDC复合片的类型

Fig.2 Types of PDC cutters

石。随着钻头的回转,楔形齿在岩石中“犁”出一条破碎穴槽,紧随其后的圆形切削齿则以剪切方式,大面积切削强度已经大大减弱了的井底岩石,达到快速钻进的目的。而且,还可以起到缓冲器的作用,大大提高钻头的抗冲击强度,对钻头的横向振动可以起到一定的抑制作用。

圆锥弧形复合片破碎岩石的表面呈弧形,受力条件好,能够承受较大的钻压和动载荷,在负前角镶焊的情况下,容易切入岩石,对于破碎硬岩比较有利。由于复合片表面呈圆弧形,有利于岩粉向四周分流,及时排离切削面,减少复合片的磨损。所以,这种复合片更适用于较硬岩石,承受比较复杂的受力条件,应用范围较广。

把楔形复合片和圆锥弧形复合片结合起来,将其安置在钻头上的不同部位,使其发挥各自的优点,可以提高机械钻速,增加钻头进尺,取得好的技术经济效益。

利用楔形复合片和圆锥弧形复合片组合设计出来的油气井双层钻头,经过生产试验,取得了较好的技术经济效益。

这种新钻头的生产试验,是在俄罗斯科研生产企业《罗斯托夫钻井公司》进行的。为了进行对比,使用了直径215.9 mm的复合片钻头和俄罗斯国产三牙轮钻头Ⅲ215.9СГВ,在钻进可钻性6~7级岩石中,在2200~2600 m井段进行钻进对比。虽然开发出来的新型复合片钻头的成本高一点,但是新型复合片钻头的钻头进尺是三牙轮钻头进尺的8倍,一个复合片钻头的经济效益为11万6552卢布,可见经济效益是很高的,受到了有关单位的好评^[8-10]。

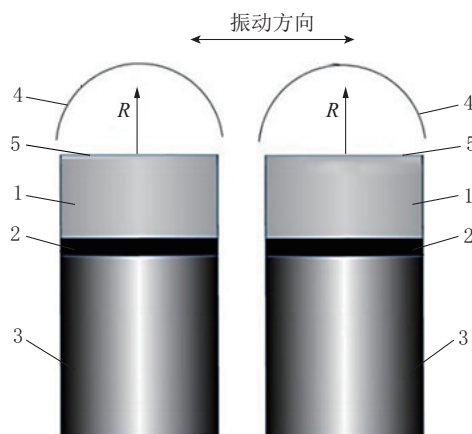
2 凹状曲面PDC切削具的提出和计算

楔形复合片和圆锥弧形复合片组合的PDC钻头,横向振动问题尚未完全解决,俄罗斯西伯利亚联邦大学涅斯科罗姆内赫.V.V.(Нескоромных В.В.)教授等提出使用凹状曲面PDC切削具钻头,以解决这个横向振动问题,并做了大量的工作^[10-22]。

应该说,横向振动是常见的振动类型之一,也是PDC钻头钻进时的一种主要振动类型。

使用凹状曲面PDC切削具之所以是解决钻具横向振动问题的方案之一,主要是因为使用这种切削具,可以提高钻进时切削具与孔底岩石的摩擦力,易于实现各个切削具切削力的平衡,等等。

从图3可以看出钻进过程中PDC切削具与孔底岩石相互作用的情况。标准的PDC切削具由聚晶金刚石平面研磨层1、硬质合金底座2和刚体3组成。钻头上镶的PDC切削具是定向的,光滑的切削面与岩石切削剪切方向是一致的。切削具的形状这样布置时,工作面上的摩擦力很小,这是可能导致钻具产生横向振动的主要原因之一^[12]。



1—聚晶金刚石层;2—硬质合金底座;3—刚体;4—岩石破碎范围; R —岩石切削剪切力的向量;5—碎岩工作面

图3 两个并排排列PDC切削具工作示意

Fig.3 Schematic diagram of the two side-by-side PDC cutters in cutting

根据岩石破碎原理得知,对岩石进行切削剪切破碎的 R 是轴载 P_{oc} 和剪切载荷 F 的合力。改变合力 R 的方向,与从孔底来的阻力的再分配有关,也与 P_{oc} 和 F 的大小和比例有关。在钻进规程稳定条件(切削具切入岩石深度 h 不变)下,切削具的切削剪切碎岩合力 R ,将以与其切削面5成直角的角度集中(见图3)。

为了把碎岩的能量能在PDC切削具中心集中起来并将其引入岩层,以提高破碎岩石效果,需要使切削具破碎岩石部分的整个表面,形成纵向凹状曲面(见图4)。

用凹状曲面切削具钻进时,可把岩石切削剪切力分成彼此同向的几个向量 R_i ($R=\sum R_i$),见图5(a)。 R_i 的反作用力可以防止切削具横向振动,从而消除钻头振动。但是,这种情况只有在向量 R_1 和 R_2 的数值足以使切削具破碎岩石稳定时才可能发生,见图5(b)。

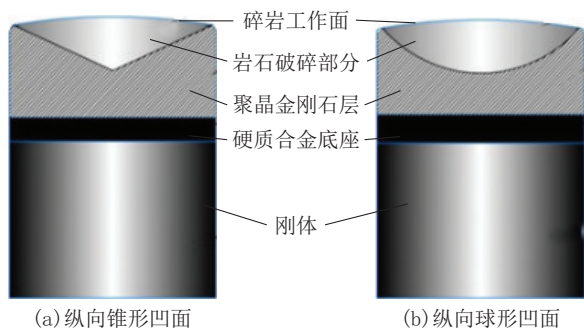


图4 钻头切削具切削表面形状结构示意图

Fig.4 Design of the cutting surface form of the cutter

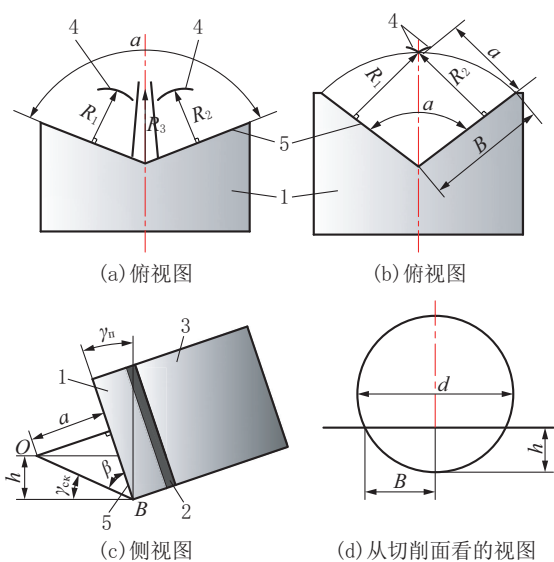


图5 工作面呈圆锥形凹面PDC的几何形状和诸力分布示意

Fig.5 Geometry and force distribution of the PDC cutter with conic concave cutting surface

如果 R_1 和 R_2 在形成的碎岩区4不能相遇,则在切削平面中心部分5中,就会出现一个破碎切削具前面余下岩柱需要的向量 R_3 。如果 $R_3 > (R_2 + R_1)$,则振动不会消除。减振作用只有在切削剪切力的向量 R_1 和 R_2 的方向,可以使由于这两个力的作用而使岩石破碎,并在与切削具中心线上相交才能得到保证(图5b)。在这种情况下,将有两个向量,且这两个向量相等($R_1 = R_2$),则切削具横向振便可消除。

可以通过改变切削平面顶角 α 的办法,来改变切削具凹面5切削剪切力的分布。PDC切削具纵向凹面可有2种形式:圆锥形凹面(图4a)和球形凹面

(图4b)。我们以圆锥形凹面切削具为例进行讨论^[12]。

图5(b)表明,切削具和岩石相互作用时,如果2个向量 R_1 和 R_2 的方向,可以使由于这两个力的作用而使岩石破碎,并在位于通过切削具中心线的平面内相交,则圆锥形凹面的顶角 α 可按下列公式计算:

$$\alpha = \arctan \frac{2a}{B}$$

式中: a ——向量 R 的长度; B ——凹面圆锥体母线的长度。

从几何上分析切削具与岩石的相互作用(图5c),我们得到向量 R 的长度 a :

$$\begin{aligned} a &= OB \cdot \sin \beta \\ \beta &= 90^\circ - \gamma_{ck} - \gamma_n \\ OB &= \frac{h}{\sin \gamma_{ck}} \end{aligned}$$

故向量 R 的长度 a :

$$a = \frac{\sin(90^\circ - \gamma_{ck} - \gamma_n) \cdot h}{\sin \gamma_{ck}}$$

凹面圆锥体母线长度 B 与切削具直径 d 和岩石切削剪切深度 h 的相关(见图5d)如下:

$$B = \sqrt{dh - h^2}$$

所以,可使横向振动消失的切削具切削表面凹面圆锥体顶角 α ,按下式计算:

$$\alpha = 2 \arctan \frac{2 \cdot h \cdot \sin(90^\circ - \gamma_{ck} - \gamma_n)}{\sin \gamma_{ck} \cdot \sqrt{dh - h^2}}$$

俄罗斯批量生产的PDC切削具系列的直径 d 为8、13、16和19 mm。如果设定切削具切入岩石深度(每转进尺) h 和推荐切削具安装角度,例如 $\gamma_{ck} = 20^\circ$ 、 $\gamma_n = 20^\circ$,则可以计算出切削具凹状切削面的最优顶角 α 见表1。

3 凹状曲面切削具受力计算机仿真模拟及结果

为了分析凹面切削具的水力动力学情况,对其进行了计算机仿真模拟^[11-12]。

计算机仿真模拟是用有限元方法完成的。为了简化研究系统,模型由3部分组成:切削具、孔底部分和冲洗液。为了可以进行对比,对用按照 Ulterro 工艺镶焊的金刚石PDC钻头和镶有凹面锥体PDC切削具的钻头进行钻进时的水力学过程,进行了模拟。

表1 可以消除横向振动的切削具凹状锥体顶角计算结果^[12]

Table 1 Calculating results of the apex angle of the cutter concave cone for damping of lateral vibration

PDC 直径 d / mm	每转进尺 h / mm	母线长度 B / mm	凹面圆锥体顶 角 $\alpha/(^{\circ})$
8	4	4	155.0
	2	3.5	137.5
13	6.5	6.5	155.0
	3	5.5	135.7
16	8	8	155.0
	4	7	137.5
19	2	5	104.0
	9.5	9.5	155.0
	5	8.4	139.0

3.1 按照 Ulterro 工艺镶焊的金刚石 PDC 钻头的模拟

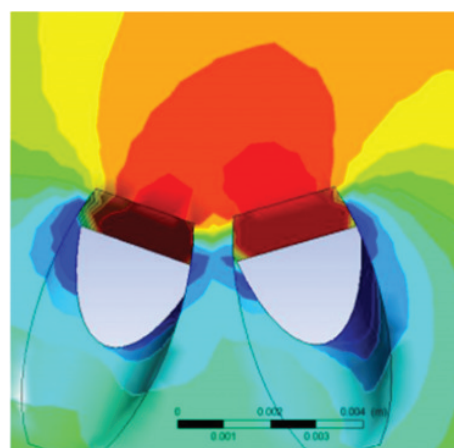
在这种 PDC 切削具钻头设计中,特别注意切削具的形状和布置。Ulterro's New Counter Force Technology 公司的钻头结构,在防止振动方面取得了积极成果。该钻头生产公司建议,在钻头端面上的 2 个相邻切削具宜呈定向排列,切削面迎面靠近,这样可以消除钻头横向振动。该公司确认,除了钻头工作稳定外,这种结构 Ulterro 钻头还有利于把振动能量导入地层,以提高碎岩效果。Ulterro 钻头使用效率表明,一年钻进了 1500 万 m 长度的井眼。根据《Drilling contractor》国际承包协会公布资料,在 Eagle Ford(德克萨斯州)油田使用 Ulterro 钻头,创造了钻井速度记录(速度增加近 40%)。同时,钻进 15 h 就获得了 50000 美元的经济效益。

根据计算机模拟结果(见图 6),在两个相邻 PDC 按照 Ulterro 工艺安装(两个切削具定向、迎面靠近)时,“介质”(即岩屑和冲洗液的混合物)的最大压力区集中在两个切削具之间,二者安排越近,压力值越大。但是,间隙小,会产生局部阻力,导致这种水力压力状态不能使冲洗液通过两个切削具之间的部分,在一定地质条件下可能形成岩屑堵塞,引起切削具烧毁。

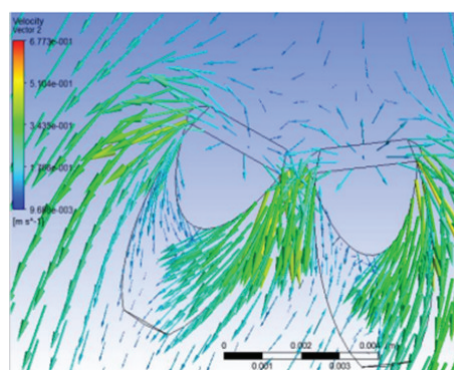
3.2 凹面切削具钻头受力计算机仿真模拟

标准平面切削具和凹面切削具的水力压力,以及切削具安装角度对其的影响见图 7。

与用标准平面 PDC 切削具进行钻进时一样,在凹状曲面切削具下面也可以看到有水力压力不同的



(a) 两个相邻切削具范围内的压力区分布图
(红色为压力最大区)



(b) 两个相邻切削具范围内冲洗液的
流动方向和速度图

图6 使用按照 Ulterro 工艺安装的钻头钻进时,井底产生的水力动力学过程的模拟结果

Fig.6 Simulation results of the downhole hydrodynamic process while drilling with the PDC bit of Ulterro technology

压力区(图 7b)存在。切削具安装前角的变化,对此压力区分布的性质有一定影响,其对凹状曲面切削具的影响比标准平面切削具的影响更大。同时,计算机模拟研究结果表明,在其他条件相同情况下,凹状曲面切削具有利于降低水力压力数值的水平。从图 7 可见,在相同条件下,镶有 PDC 安装前角 $\gamma_n = -25^{\circ}$ 的凹面切削具下面的压力,比标准平面 PDC 切削具下面的压力低 25%~50%(图 7a、b)。安装前角较小时,也有类似情况。例如,在安装前角 $\gamma_n = -15^{\circ}$ 时,凹面切削具下面的压力比平面切削具下面的压力低 50% 以上(图 7c、d)。可见,凹面切削具下面的压力比平面切削具下面的压力小,有利于破碎孔底岩石,提高碎岩效果。而且,安装前角 $\gamma_n = -15^{\circ}$ 时压力降低的幅度,比 PDC 安装前角 $\gamma_n =$

-25°时的幅度大,说明安装角度小一点,可能压力会更小,效果会更好。

在任何钻进条件下和任何钻头切削具镶装角度条件下,凹面切削具都有利于在PDC工作端面的中心部分,集中形成高压区和冲洗液压力最高区。随

着凹面切削具安装前角数值的减小,例如,在安装前角 γ_n 从-25°变到-15°时,如图7(b)、7(d)所示,可以看到最大压力区有从切削具凹面移向切削具与岩石接触处(面)的趋势。

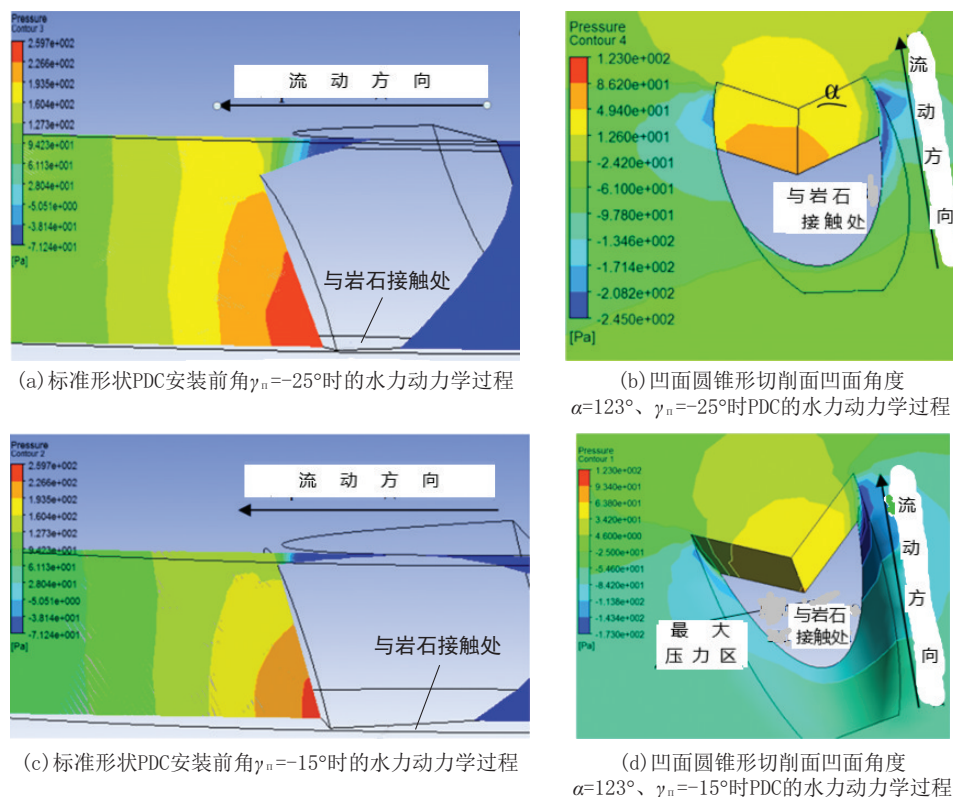


图7 PDC切削具范围内产生的水力动力学过程模拟结果

Fig.7 Simulation results of the hydrodynamic process with the limits of the PDC cutter

水力压力与凹状曲面圆锥顶角 α 的关系见图8。

图8(a)表示在凹面圆锥顶角 $\alpha=104^\circ$ 时,PDC切削具的3个压力区的分布情况(红色表示压力最大区,黄色表示压力最小区),最大压力区主要位于沿着切削具凹曲的位置上。凹面锥体顶角增到 $\alpha=155^\circ$ 时,切削具的压力降低30%左右,而且最大压力区不完全集中在凹状曲面上(见图8b)。

切削具最大压力区的范围越大,“介质”(即冲洗液和岩屑混合物)对形成岩石切入阻力的可能性越大,故在孔底压力集中地区,冲洗液容易进入地层,有利于孔底形成岩石的预破碎。

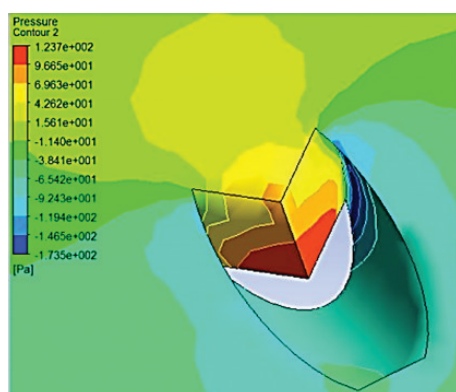
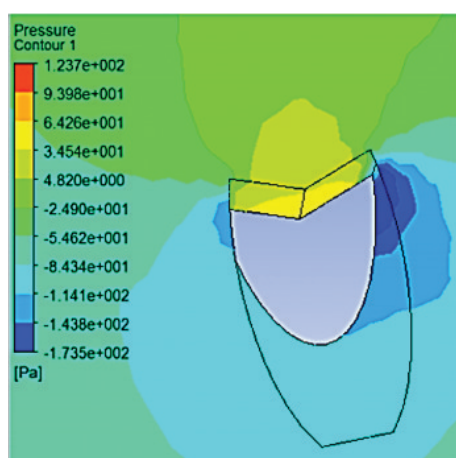
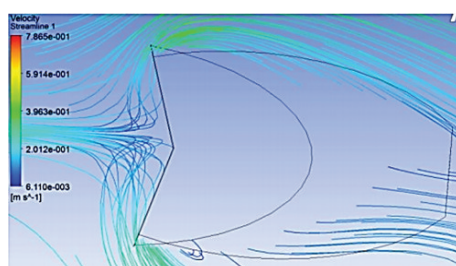
从图8可见,不论凹状曲面角度 α 大小如何,进入切削具下方的主要冲洗液量,都是力图进入PDC

切削面的中心部分,在此形成紊流。当冲洗液流遇到岩石后,液流分成2个大小相等、方向相反的液流,进入切削具的范围内,冲洗切削具工作表面的侧部(见图8c)。可以通过提高改变顶角 α 的办法来控制冲洗液的压力。减小角度 α ,有利于增加冲洗液在切削具切削平面上的流速,其结果是可以提高冲洗液进入岩石的强度及其排屑能力,因而可以提高切削具的冷却效果。

4 分析、讨论和建议

根据上述材料可做如下分析、讨论和建议。

(1)PDC钻头在石油天然气钻井和地质钻探中得到了广泛的应用,取得了很好的技术经济效果,受到了有关单位的好评和重视。但是,钻具振动及由

(a) 圆锥形凹面顶角 $\alpha=104^\circ$ 时压力区分布(b) 圆锥形凹面顶角 $\alpha=155^\circ$ 时压力区分布(c) 圆锥形凹面顶角 $\alpha=155^\circ$ 切削具范围内的冲洗液流线图8 圆锥形凹面PDC ($\gamma_n=-25^\circ$)范围内产生的水动力学过程的计算机模拟结果Fig.8 Simulation results of the hydrodynamic process within the limits of the PDC cutter with concave conic cutting surface ($\gamma_n=-25^\circ$)

其引起的钻头非正常磨损问题,直接影响机械钻速、钻头进尺的提高和正常钻进的保证,钻孔质量也受一定影响,成了急需解决的问题。解决PDC钻头振动问题,首要的是要解决PDC切削具的振动问题。

(2)国内外钻探专家提出使用楔形切削具和圆柱锥形切削具,虽然使非正常磨损和振动问题有一定缓解,但未根本解决。俄罗斯科学工作者对使用

凹状曲面PDC切削具来解决振动问题,进行了研究和试验,提出了建议,是一个创新,有一定参考价值,值得引起我们的注意。使用这种切削具来消除横向振动的机理主要是要增加切削具和岩石破碎时产生的摩擦力。

(3)研究和计算表明,为了保证消除横向振动,建议使用凹状曲面切削具。凹状曲面切削具的最优顶角 α 范围应该是位于 $104^\circ\sim 155^\circ$ 之间,切削具安装前角一般为 $15^\circ\sim 20^\circ$,一定不能为 0° 。在钻进较软岩石时,可以减小凹状曲面顶角、增加切削具安装角,以便利用冲洗液流能量形成岩石预破碎区。在钻进破碎岩石时,建议使用尽量大的凹状曲面角度切削具,切削具安装角尽量小,易于切削具切入岩石、适时冲洗预破碎区和降低介质阻力,因而提高破碎岩石效果。

(4)计算机模拟表明,使用凹状曲面切削具还有利于岩石破碎和预破碎,可以根据所钻岩石的性质,通过调整凹状曲面角度 α 和切削具安装角度 γ_n 来实现其更有效地破碎岩石。

(5)俄罗斯这种新型切削具经过了理论研究和分析计算,有一定创新性和适用价值。但是,尚未见到其生产使用结果的材料,需要跟踪取证,以便评价其有效性和使用前景。

参考文献(References):

- [1] 胡郁乐,张惠,王稳石,等.深部岩心钻探关键技术[M].武汉:中国地质大学出版社,2018.
HU Yule, ZHANG Hui, WANG Wenshi, et al. Key Technologies in Deep Core drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
- [2] 汤凤林,段隆臣,ЧИХОТКИН В.Ф.,等.关于利用系统论方法设计金刚石钻头的分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(1):13-19.
TANG Fenglin, DUAN Longchen, CHIKHOTKIN V. F., et al. Analytical research on design of diamond drill bit with system theory approach[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(1):13-19.
- [3] 朱恒银,王强,杨展,等.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.
ZHU Hengying, WANG Qiang, YANG Zhan, et al. Research and Application of Diamond Bit for Deep Geological Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [4] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Kaihua, et al. Deep

- Core Drilling Technology and Management[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [5] 段隆臣,潘秉锁,方小红. 金刚石工具的设计与制造[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2012.
- DUAN Longchen, PAN Bingsuo, FANG Xiaohong. Design and Manufacture of Diamond Tools[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2012.
- [6] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等. 深部各向异性硬岩钻进用新型金刚石钻头试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(4):74-79.
- TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Experimental research on new type diamond bit for drilling in deep hard anisotropic rocks[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4):74-79.
- [7] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等. 关于切削型多节式刮刀钻头的分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(6):88-92.
- TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Analytical research on cutting type multitierwing bit[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6):88-92.
- [8] Третьяк А. А., Борисов К. А. Классификация поломок пласти PDC, вызываемых забойными вибрациями при бурении скважин [С]. Результаты исследований –2020: Материалы 5-ой Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ)-Новочеркасск, 2020:252-254.
- [9] Р. Р. Мингазов, Г. Г. Ишбаев и др., Снижение вибраций в процессе бурения путем совершенствования конструкции PDC долот[J]. Бурение и нефть, 2021(7):13-18.
- [10] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等. 深部钻进用新型复合片钻头的试验研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(1):39-48.
- TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Experimental research on a new generation PDC bit used for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1):39-48.
- [11] Нескоромных В. В., Попова М. С., Баочанг Л. Влияние среды прибойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом PDC [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. Россия, г.Красноярск, 2021(9):119-127.
- [12] Нескоромных В. В., Попова М. С., Баочанг Л. Резцы PDC с вогнутой поверхностью режущей грани [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. Россия, г.Красноярск, 2022(4):181-192.
- [13] Нескоромных В. В., Попова М. С., Чихоткин А. В. Методика проектирования долот с резцами PDC, учитывающая динамические процессы резания-скалывания горной породы и сопротивление среды [J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море, 2020(4):14-17.
- [14] Нескоромных В. В. и др. Алгоритм управления системой алмазного бурения [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. Россия, г.Красноярск, 2022,(11):114-126.
- [15] Нескоромных В. В., Попова М. С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев [J]. Записки Горного Института, 2019, 240:701-710.
- [16] Нескоромных В. В., Попова М. С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом [М]. Красноярск, Россия, Сибирский федеральный университет, 2020.
- [17] Нескоромных В. В. Оптимизация в геологоразведочном производстве [М]. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013.
- [18] Нескоромных В. В., Попова М. С., Харитонов А. Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания - скалывания горной породы алмазным резцом [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2020, 331(10):40-48.
- [19] А. А. Буканов, Л. К. Горшков, А. И. Осецкий, Н. В. Соловьев. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента [J]. Разведка и охрана недр, 2013(7):44 - 49.
- [20] Коротков А. В. Современный взгляд на основные задачи оптимизации алмазного бурения [J]. Известия сибирского отделения РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2011, 2(39):205-209.
- [21] Борисов К. И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC [М]. Томск: ТПУ, 2013.
- [22] А. Я. Третьяк, В. В. Попов, А. Н. Гроссу, К. А. Борисов/ Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента [J]. Горный информационно - аналитический бюллетень, 2017(8):225-230.

(编辑 荐华)