

PDC钻头V形齿的磨损对岩石接触面积的影响

祁任泽, 任雷, 卜长根*

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要:随着深海深地钻探需求的增加,使用传统PDC钻头井下钻具磨损严重,不能够完全满足深井硬地层的钻进要求,因此异型齿PDC钻头尤其是V形齿PDC钻头成为了研究重点。目前关于V形齿PDC钻头磨损对接触面积的影响研究较少,接触面积大小会影响切削齿的接触压力,进而影响侵入岩石深度和切削效率,研究V形齿接触面积的变化规律具有重要意义。针对V形齿在磨损阶段与岩石接触面积的计算问题,通过使用平面斜截复合片所在圆柱面的方法,推导了接触面积与磨损高度和V形齿弦长、切角等几何参数的函数表达式,并分析了V形齿几何参数、磨损高度对接触面积和接触压力的影响。结果表明:在磨损初期,圆柱形齿与V形齿接触面积相同,当复合片磨损到一定阶段,V形齿接触面积更小,且弦长、切角越小,接触面积越小;在相同载荷下,相对于圆柱形齿,磨损到一定阶段后V形齿与岩石接触压力更大,具有更切入岩石的能力。在现场应用时,测量一批同型号钻头提钻后的磨损高度及其提钻前对应的钻速,获得该型号钻头的磨损高度与钻速之间的统计关系,进而通过磨损高度估算接触面积,方便及时调整钻压,以维持较高的钻速,或设计时优化V形齿几何参数,也有利于提高钻进效率。

关键词:PDC钻头;V形齿;磨损高度;接触面积;钻压;钻井提速

中图分类号:P634.4⁺1;TE921 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)03-0103-07

Influence of wear on rock contact area of V-shaped cutter PDC bit

QI Renze, REN Lei, BU Changgen*

(School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: With the increasing demand for deep-sea and deep-earth drilling, the downhole drilling tools using traditional PDC bits are severely worn out and cannot fully meet the drilling requirements of deep wells in hard formations. Therefore, special-shaped cutter PDC bit, especially V-shaped cutter PDC bit, has become the focus of research. There are fewer studies on the effect of wear on the contact area of V-shaped cutter PDC bit. The contact area affects contact pressure of cutter, which in turn affects the depth of penetration into the rock and drilling efficiency, so it is of great significance to study the change rule of contact area of V-shaped cutter. In order to calculate the contact area of V-shaped cutter with the rock during wear, the expressions for contact area as a function of the wear height and the geometric parameters of V-shaped cutter, such as chord length and tangent angle, were derived using the method of planar oblique intersection of the cylindrical surface on which the cutter is located, and the effects of the geometric parameters of V-shaped cutter and wear height on contact area and contact pressure were analyzed. The results show that the cylindrical cutter and V-shaped cutter have the same contact area in the early stage of wear, when the cutter is worn to a certain stage, the contact area of the V-shaped cutters is smaller than that of the cylindrical cutter. The smaller the chord length and tangent angle are, the smaller the contact area is. Under the same load and the wear height of the cutters, the contact pressure between the V-shaped cutter and rock is larger than that of the cylindrical cutter, so the V-shaped cutter has the ability to penetrate deeper into the rock. For wellsite applications, the driller can measure

收稿日期:2024-08-13;修回日期:2024-11-13 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.03.013

第一作者:祁任泽,男,汉族,2000年生,硕士研究生,机械工程专业,研究方向为PDC钻头的切削性能及磨损机制,北京市海淀区学院路29号,2002220001@email.cugb.edu.cn。

通信作者:卜长根,男,汉族,1963年生,教授,博士生导师,博士,从事地质工程与振动理论研究工作,北京市海淀区学院路29号,bucg@cugb.edu.cn。

引用格式:祁任泽,任雷,卜长根.PDC钻头V形齿的磨损对岩石接触面积的影响[J].钻探工程,2025,52(3):103-109.

QI Renze, REN Lei, BU Changgen. Influence of wear on rock contact area of V-shaped cutter PDC bit[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3):103-109.

and record the wear height and the corresponding ROP of a batch of bits of the same type after lifting. The statistical relationship between the wear height and ROP can be obtained for this type of bit, and then the contact area can be estimated from the wear height. This method makes it easy to adjust the weight on bit in time to maintain a high ROP, or to optimize the V-shaped cutter geometry parameters during design, which also helps to improve drilling efficiency.

Key words: PDC bits; V-shaped cutter; wear height; contact area; weight on bit; speed up drilling

0 引言

近年来,经济的快速发展导致对资源的需求量逐步提升,但目前浅部资源开发已经到达一定的饱和度,因此深部资源开采问题成为当下急需解决的问题^[1]。传统PDC钻头因在材料和切削原理上的局限性,不能够完全满足深井中坚硬地层、强研磨性地层、软硬互层及砾石层钻进的要求^[2]。在花岗岩等硬岩地层钻进过程中,井下钻头钻具的磨损和消耗十分严重,钻进难度极大,成本骤增^[3],需要开发新型PDC钻头满足钻探需求,提高钻进效率,节约成本。

随着深海深地钻探需求的增加^[4],越来越多的学者开始研究异型齿PDC钻头对钻进过程的影响^[5-16],其中V形齿即经过V形面切割的圆柱形齿成为研究重点。为进一步提升含砾岩层的破岩效率和钻井速度,颜辉等^[17]在多棱齿的基础上设计了新型箭头多棱齿,类似于V形齿,其切削刃与地层接触面比常规PDC更小,与其他齿形相比耐冲击性提高36.4%,耐磨性提高11.1%,获得更高的机械钻速和进尺,进而获得更高的碎岩效率。罗鸣等^[18]通过仿真研究了V形齿、脊形齿和圆柱形齿3种齿形的破岩机械比能(MSE),V形齿效率更高。Rahmani等^[19-20]使用V形PDC切削齿增加岩石内的应力集中,以解决传统PDC钻头在碳酸盐岩和一些硬岩中钻进速度慢的问题,对全尺寸传统PDC钻头和V形齿PDC钻头进行实钻测试,任意钻压(WOB)时,V形齿PDC钻头钻速(ROP)提升100%;任意钻速时,扭矩减小了20%。V形齿PDC钻头已成功应用于钻进硬岩地层,美国犹他FORGE实验室地热注水井16A(78)-32钻进中遇到花岗岩地层时,使用锥部和后排位置为V形齿的PDC钻头,对比其他两种非V形齿PDC钻头,初始钻速更高,钻头磨损后的稳定钻速也更高,进尺显著增加^[21]。Rahmani等^[22]使用圆柱形、V形齿PDC钻头钻进花岗岩和石英岩硬岩,V形齿PDC钻头机械钻速高于圆柱齿PDC钻头,破碎比功更小,使用V形齿PDC钻头和

V形齿+圆柱齿混合齿PDC钻头在美国德州西部米德兰盆地进行钻进试验,V形齿PDC钻头的ROP比混合齿PDC钻头更高,且V形齿的损坏程度与圆柱齿相似或更小,位于V形齿PDC钻头刀翼上的切削齿PDC层脱落的现象较少。关于复合片磨损平面的大小,李彦操^[23]使用3D轮廓测量仪测量圆柱形PDC齿磨损平面的大小,没有给出面积的理论计算公式。大量研究表明,相对于圆柱齿PDC钻头,V形齿PDC钻头具有更大的钻速和更高的钻进效率,已有学者研究了增加切削齿工作面积、降低井眼底部岩石抗钻能力和使用自旋转切削具的钻井提速方法^[24-26],但以上研究并没有从切削齿磨损接触面积的角度揭示其提速机理。张春亮等^[27]进行磨损齿切削实验,证明了接触面积大小会影响切削齿与岩石间的接触压力,进而影响侵入岩石深度和切削效率。基于本课题组之前的研究^[28],可直接根据切削齿的磨损高度定量计算磨损后与岩石的接触面积,有利于研究V形PDC齿与岩石的相互作用。

综上所述,相对于圆柱形齿PDC钻头,V形齿PDC钻头在钻进硬岩地层时有更好的效果。因此,基于V形PDC切削齿的几何参数建模,研究PDC齿磨损高度与岩石接触面积函数关系的理论算法,对比研究V形齿和圆柱形齿在不同磨损阶段接触面积的差异,通过V形PDC齿磨损与岩石接触面积的角度揭示V形PDC切削齿提速的机理,以利于完善V形齿PDC钻头的设计并进一步提高其钻进效率。

1 岩石接触面积 S 与磨损高度 Δh 的函数关系

在圆柱形齿的基础上,假想延长复合片所在圆柱面(双点划线矩形框),并用一定角度的V形面切割圆柱体得到V形齿(如图1、图2所示),与圆柱形齿相同,随着复合片的磨钝,会在复合片的前端形成磨损面。随着磨损高度 Δh 增加,磨损平面与岩石的接触面积增加,影响钻头与岩石之间的接触压

力,因此需要求出复合片的磨损高度 Δh 与接触面积 S 之间函数关系的理论计算公式。通过现场钻进,测量一批同型号PDC钻头复合片的磨损高度 Δh ,并记录这批钻头提钻前的钻速,得到该型号钻头的磨损高度与钻速之间的统计关系。当再次使用该型号钻头钻井时,可根据钻速变化预测接触面积 S ,进而根据接触面积 S 大小调整钻压,保证钻头与岩石之间的接触压力不变,减少提钻和更换钻头的次数,有助于降低钻井成本。

在钻进过程中复合片与岩石接触,磨损一定高度 Δh 后,复合片上形成一个磨损平面,其与复合片轴线的夹角等于前倾角 α 。水平面截切复合片外表面,得到部分椭圆或部分椭圆+梯形的接触面。V形齿与圆柱形齿不同,在磨损初期,位于 AB 之间的假想水平面 P_1 截切V形齿外表面,其中 A 点为V形齿圆弧中点, B 点为V形齿圆弧端点,得到此时接触面积为部分椭圆的面积;当复合片磨损高度 $\Delta h > \Delta h_c$ 后,位于 B 点之上的假想水平面 P_2 截切V形齿外表面,得到接触面积为部分椭圆+梯形面积之和。此时复合片受到切削力 F_t 和轴向压力 F_{WOB} ,随

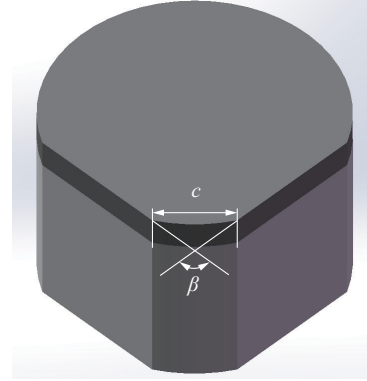


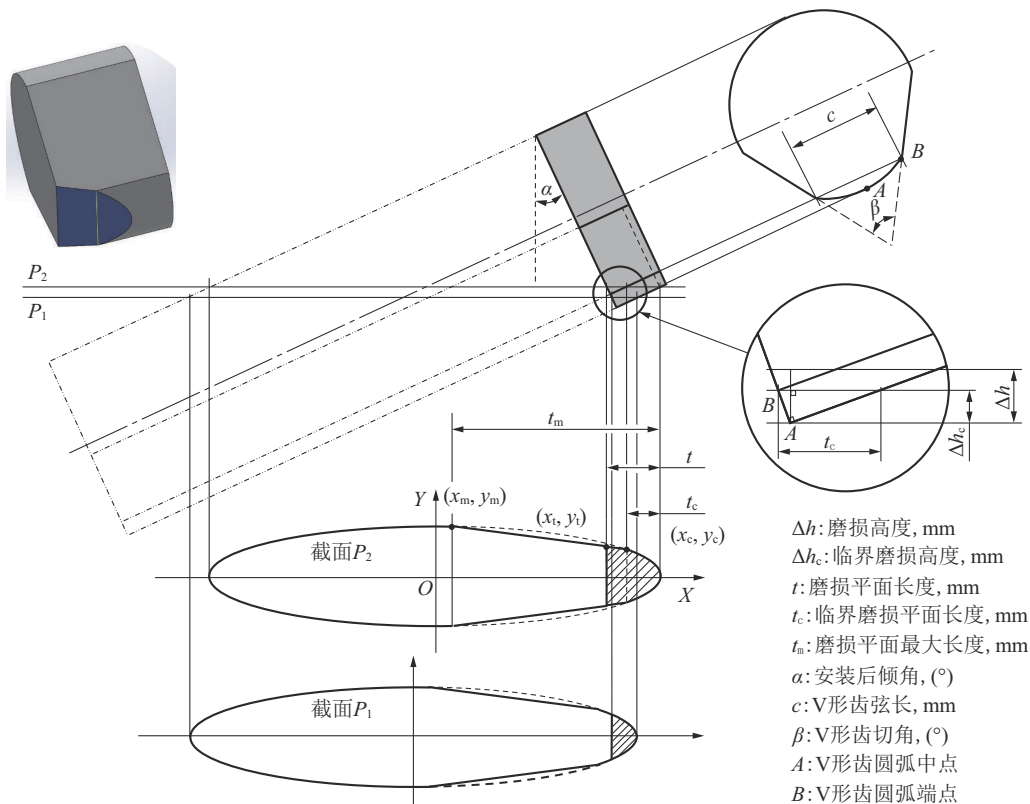
图1 V形齿

Fig.1 V-shaped cutter

着磨损高度 Δh 的增加,截交线椭圆轮廓不变。

在磨损初期, $\Delta h \leq \Delta h_c$ 时,接触面积为椭圆的一部分(截面 P_1),接触面积 S 与复合片的磨损高度 Δh 的关系如式(1)所示^[28]:

$$S = \frac{\pi d^2}{8 \sin \alpha} \left[1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \left(1 - \frac{2 \Delta h}{d \cos \alpha} \right) \right] - \left(d - \frac{2 \Delta h}{\cos \alpha} \right) \sqrt{d \Delta h \cos \alpha - (\Delta h)^2 / \sin 2 \alpha} \quad (1)$$

图2 V形齿接触面积 S 计算示意Fig.2 Schematic diagram for calculating the contact area S of V-shaped cutter

式中: d ——复合片直径,mm。

当复合片磨损到一定阶段, $\Delta h > \Delta h_c$, $t = 2\Delta h / \sin 2\alpha$ 为接触面的宽度,截面 P_2 经过复合片被V形面切割的区域,其与PDC齿截面(磨损面)增加了梯形面积(见图2)。此时接触面积 S :

$$S = S_I + S_{II} \quad (2)$$

式中: S_I ——部分椭圆面积,mm²; S_{II} ——梯形面积,mm²。

计算随磨损而渐变的梯形面积,以 P_2 截平面的椭圆中心点 O 为坐标原点建立直角坐标系,给定3个点的坐标 (x_m, y_m) 、 (x_t, y_t) 、 (x_c, y_c) ,分别为梯形极限长底边、任意位置长边和短底边端点的坐标。可知 $x_c - x_t = t - t_c$ 即为阴影梯形高, $2y_t$ 为梯形的长底边,又因梯形短底边为V形面截得的弦长 c ,根据梯形面积公式得到阴影部分梯形面积 S_{II} :

$$t_m = \frac{d \cos(\beta/2) \cos[\arcsin(c/d) + \beta/2] + (d/2) \{1 - \cos[\arcsin(c/d)]\}}{\sin \alpha} \quad (7)$$

进一步得到梯形极限长底边端点的横坐标 x_m :

$$x_m = \frac{d}{2\sin \alpha} - t_m = \frac{d}{2\sin \alpha} - \frac{d \cos(\beta/2) \cos[\arcsin(c/d) + \beta/2] + (d/2) \{1 - \cos[\arcsin(c/d)]\}}{\sin \alpha} \quad (8)$$

将横坐标 x_m 代入式(6)得到梯形极限长底边端点坐标 (x_m, y_m) ,则其长底边长度 $c_{\max} = 2y_m$ 。

梯形长、短底边长度分别为 $c_{\max} = 2y_m$ 、 $c = 2y_c$,已知其两底边距离 $x_c - x_m$,求解特定磨损高度时,截面 P_2 与复合片交线横坐标 x_t 对应长底边长度 $2y_t$,又已知交线与短底边距离 $x_c - x_t$,两梯形几何相似,可以得到:

$$y_t = \frac{(c_{\max} - c)(t - t_c)/(t_m - t_c) + c}{2} \quad (9)$$

将式(9)求得的 y_t 代入式(3)得到梯形面积 S_{II} :

$$S_{II} = \frac{[(c_{\max} - c)(t - t_c)/(t_m - t_c) + 2c](t - t_c)}{2} \quad (10)$$

式(10)所有变量均为已知,可以求得梯形面积 S_{II} ,其中变量 t 与磨损高度 Δh 有关,因此梯形面积 S_{II} 与磨损高度 Δh 之间存在函数关系。

当给定V形齿复合片的直径 d 、后倾角 α 、弦长 c ,可以得到 Δh_c :

$$\Delta h_c = \left(\frac{d}{2}\right) \cos \alpha \left\{1 - \cos \left[\arcsin \left(\frac{c}{d}\right)\right]\right\} \quad (11)$$

将 $\Delta h = \Delta h_c$ 代入式(1)即可得到 S_I 。

$$S_{II} = (2y_t + c)(t - t_c)/2 \quad (3)$$

根据式(3),为了计算梯形面积,需要求解 y_t 和 t_c ,由几何关系可得:

$$t_c = \frac{d}{2\sin \alpha} \left\{1 - \cos \left[\arcsin \left(\frac{c}{d}\right)\right]\right\} \quad (4)$$

得到阴影梯形高 $t - t_c$:

$$t - t_c = \frac{2\Delta h}{\sin 2\alpha} - \frac{d}{2\sin \alpha} \left\{1 - \cos \left[\arcsin \left(\frac{c}{d}\right)\right]\right\} \quad (5)$$

由截面 P_2 可知,求解梯形面积 S_{II} 的关键是求得任意位置的 $2y_t$ 。梯形的极限长底边为 $2y_m$,以 P_2 截平面的椭圆中心点 O 为坐标原点建立椭圆方程并化为一般式:

$$y = \sqrt{\{1 - x^2/[d/(2\sin \alpha)]^2\}(d/2)^2} \quad (6)$$

由几何关系可得:

由式(1)、(10)可知,在磨损高度 $\Delta h \leq \Delta h_c$ 时,接触面积 S 只与复合片直径 d 、后倾角 α 和磨损高度 Δh 有关,与V形齿几何参数无关;当磨损高度 $\Delta h > \Delta h_c$ 时,由于V形面的切割,接触面出现梯形,接触面积 S 除了与复合片直径 d 、后倾角 α 、磨损高度 Δh 有关,还与V形齿几何参数切角 β 、弦长 c 有关。

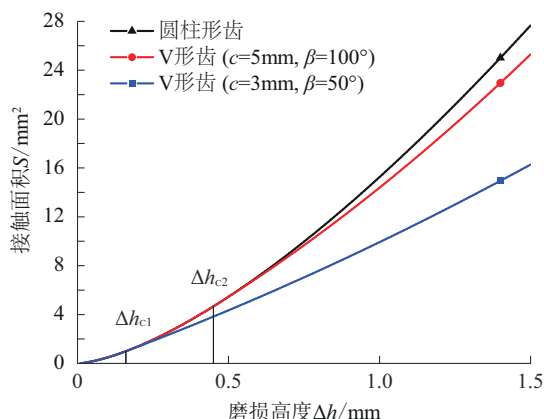
2 分析与讨论

2.1 磨损高度变化对岩石接触面积的影响

给定复合片直径 d (13.34 mm),后倾角 α (20°),两种V形复合片参数($c=5$ mm, $\beta=100^\circ$; $c=3$ mm, $\beta=50^\circ$),比较圆柱形和两种V形复合片的接触面积。根据式(1)、(10),绘制的圆柱形和V形复合片磨损高度 Δh 与岩石接触面积 S 的关系如图3所示。

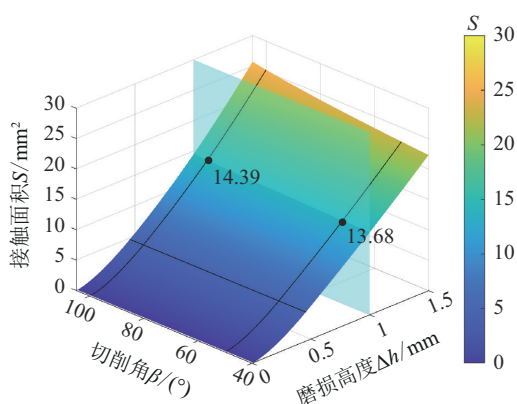
由图3可知:

(1)对于特定的复合片直径和后倾角,两种复合片的岩石接触面积都随磨损高度的增加而增加。当磨损高度 $\Delta h > \Delta h_c$ (Δh_{c1} 或 Δh_{c2})时,为磨损初期,此时两种复合片的接触面积相同;当复合片磨损高度 $\Delta h > \Delta h_c$ 时,在相同的磨损高度下,相比于圆柱形齿V形齿的接触面积更小。

图3 接触面积与磨损高度关系($d=13.34$ mm, $\alpha=20^\circ$)Fig.3 Relationship between contact area and wear height ($d=13.34$ mm, $\alpha=20^\circ$)

(2) 从图中曲线可以看出弦长 c 、切角 β 越小, 对应的接触面积变化曲线越平缓。因此对于 V 形齿, 接触面积及接触面积变化率随着弦长 c 、切角 β 的减小而减小。

为了进一步研究 V 形齿切角 β 的变化对接触面积的影响, 给定复合片直径 d (13.34 mm), 后倾角 α (20°), 弦长 c (5 mm), 改变切角 β , 比较不同几何参数 V 形复合片的接触面积。按照式 (10), 绘制的磨损接触面积 S 与切角 β 、磨损高度 Δh 的关系曲面如图 4 所示。

图4 V形齿接触面积与切角 β 关系($d=13.34$ mm, $\alpha=20^\circ$, $c=5$ mm)Fig.4 Relationship between V-shaped cutter contact area and tangent angle β ($d=13.34$ mm, $\alpha=20^\circ$, $c=5$ mm)

由图 4 可知:

(1) 在磨损初期, $\Delta h \leq \Delta h_c$ 时, 切角 β 的变化不影响接触面积的大小, 当 $\Delta h > \Delta h_c$ 时, V 形齿几何

参数开始影响接触面积 S 。

(2) 取磨损高度 $\Delta h = 1$ mm, 在相同的磨损高度下, $\beta = 40^\circ$, 接触面积 $S = 13.68$ mm², $\beta = 100^\circ$, 接触面积 $S = 14.39$ mm², 从图中可以看出随着切角 β 的减小, 接触面积 S 减小。弦长 c 变化对接触面积也有影响, 其规律与切角 β 类似。

(3) 当确定 V 形齿的几何参数和后倾角后, 测量初次下钻与提钻时的钻头高度, 得到切削齿的磨损高度, 可直接计算切削齿与岩石的接触面积。

在实际应用时应考虑复合片的强度, 在不影响破碎岩石效率的前提下尽量减小接触面积, 降低复合片的磨损速度。

2.2 V形齿磨损高度 Δh 对接触压力 p 的影响

若钻头受到轴向钻压 WOB, 单个复合片所载荷为 F_{WOB} , 随着复合片磨损高度 Δh 的增大, 会影响钻头与岩石之间的接触压力 p , 其大小为:

$$p = F_{WOB} / S \quad (12)$$

接触压力与岩石接触面积 S 成反比, 为了比较 V 形齿和圆柱形齿在相同载荷下的压力, 给定相同载荷 F_{WOB} , 由式 (12) 可得到 V 形齿压力 p_V 与圆柱形齿压力 p_R 的比值:

$$p_V / p_R = S_R / S_V \quad (13)$$

式中: S_R ——圆柱齿的接触面积, 由式 (1) 计算; S_V ——V 形齿的接触面积, 由式 (2) 计算。

为了比较不同 V 形齿几何参数对压力比值的影响, 给定复合片直径 d (13.34 mm), 后倾角 α (20°), 3 组 V 形齿参数 ($c=3$ mm, $\beta=50^\circ$; $c=5$ mm, $\beta=50^\circ$; $c=5$ mm, $\beta=100^\circ$), 按照式 (13) 绘制 V 形齿、圆柱形齿压力比值与磨损高度的关系如图 5 所示。

由图 5 可知, 在 F_{WOB} 保持不变的情况下:

(1) 由式 (11) 可知弦长 c 会影响 Δh_c 的值, 弦长 c 越小, Δh_c 越小, 因此 $\Delta h_{c1} < \Delta h_{c2}$, 会更快进入 $p_V / p_R > 1$ 的阶段, 弦长 c 对 p_V / p_R 比值影响更大。

(2) 当磨损高度 $\Delta h \leq \Delta h_c$ (Δh_{c1} 或 Δh_{c2}) 时, $p_V / p_R = 1$ 即圆柱形齿和 V 形齿压力相同; 当磨损高度 $\Delta h > \Delta h_c$ 时, $p_V / p_R > 1$, 此时 V 形齿压力大于圆柱形齿, 具有更深处入岩石的能力。

在相同的磨损高度 Δh 下, 弦长 c 、切角 β 越小, 接触面积 S 越小, 与圆柱齿相比压力越大, 单个复合片切入岩石的深度越大, 通过张春亮等^[27]的实验也

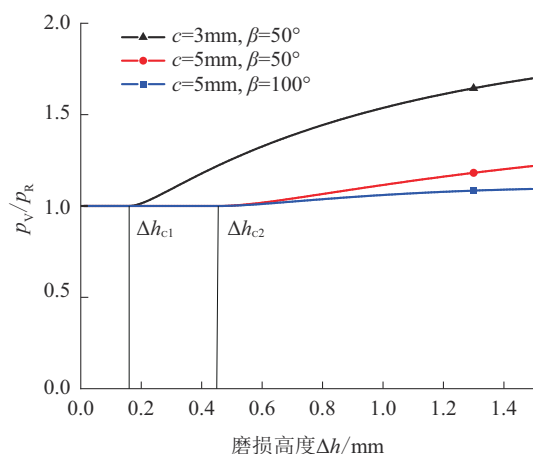


图5 p_v/p_R 与磨损高度关系($d=13.34\text{ mm}, \alpha=20^\circ$)

Fig.5 Relationship between p_v/p_R and wear height ($d=13.34\text{ mm}, \alpha=20^\circ$)

证明了切削齿磨损面积越大,钻头侵入岩石的能力越差,因此在钻进硬地层时使用V形齿PDC钻头可以维持较高的钻速。

3 结论

通过V形切削齿的建模,建立了切削齿的磨损高度与岩石接触面积之间关系,分析后得到的主要结论概括如下:

(1)V形齿的切角 β 、弦长 c 越小,接触面积 S 和其变化率越小。当复合片磨损到一定阶段时,相对于圆柱形齿V形齿的接触面积 S 更小,相同载荷下V形齿接触压力 p_v 更大,切削深度更大,相较于圆柱形齿PDC钻头可以维持较高的钻速。

(2)在现场应用时,测量一批同型号钻头提钻后的磨损高度及其提钻前对应的钻速,可以获得该型号钻头的磨损高度与钻速之间的统计关系,当使用新的该型号钻头钻井时,可直接通过磨损高度估算接触面积,进而调整钻压,维持钻速,提高钻进效率。

参考文献(References):

- [1] 张建.地质钻探技术发展现状和发展趋势[J].中国金属通报, 2023(7):7-9.
ZHANG Jian. Current status and trend of development of geological drilling technology[J]. China Metal Bulletin, 2023(7): 7-9.
- [2] 呼怀刚,黄洪春,汪海阁,等.国内外PDC钻头新进展与发展趋势展望[J].石油机械,2024,52(2):1-10.
HU Huaigang, HUANG Hongchun, WANG Haige, et al. New

progress and development trends of PDC bits in China and abroad[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(2): 1-10.

- [3] 张德龙,郭强,杨鹏,等.地热井花岗岩地层钻进提速技术研究与应用进展[J].地质与勘探,2022,58(5):1082-1090.
ZHANG Delong, GUO Qiang, YANG Peng, et al. Progress in research and application of drilling speed-up technology for granite formation in geothermal wells[J]. Geology and Exploration, 2022, 58(5): 1082-1090.
- [4] 赵尔信,方啸虎.深海深地钻探用复合片钻头的现状和展望[J].超硬材料工程,2023,35(6):45-50.
ZHAO Erxin, FANG Xiaohu. Current status and prospects of composite sheet drill bits for deep sea and deep earth drilling[J]. Superhard Material Engineering, 2023, 35(6): 45-50.
- [5] 程书婷,王红波,纪慧,等.砾岩层PDC切削齿优选试验[J].金刚石与磨料磨具工程,2023,43(1):43-48.
CHENG Shuting, WANG Hongbo, JI Hui, et al. Experimental study on optimization of PDC cutting teeth for conglomerate layer[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43(1): 43-48.
- [6] 马宏伟,耿立军,马志忠,等.忍者齿PDC钻头在渤海油田花岗岩潜山地层的应用[J].石油工业技术监督,2019,35(8):4-6.
MA Hongwei, GENG Lijun, MA Zhizhong, et al. Application of ninja teeth PDC bit in granite buried hill formation of Bohai oilfield[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2019, 35(8): 4-6.
- [7] 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.
- [8] 彭齐,周英操,周波,等.凸脊型非平面齿PDC钻头的研制与现场试验[J].石油钻探技术,2020,48(2):49-55.
PENG Qi, ZHOU Yingcao, ZHOU Bo, et al. Development and field test of a non-planar cutter PDC bit with convex ridges[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 49-55.
- [9] 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, Нескоромных В. В., et al. Parameter calculation and analysis of a novel concave surface PDC cutter[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5): 73-80.
- [10] 孙家祥,赵洪山,马莉.准噶尔盆地征10井超深井钻井关键技术[J].石油机械,2023,51(5):17-24.
SUN Jiaxiang, ZHAO Hongshan, MA Li. Key drilling technologies for ultra-deep well Zheng 10 in Junggar basin[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(5): 17-24.
- [11] 吴泽兵,席凯凯,赵海超,等.仿生PDC齿旋转破岩时的温度场和破岩特性模拟研究[J].石油钻探技术,2022,50(2):71-77.
WU Zebing, XI Kaikai, ZHAO Haichao, et al. Simulation study on temperature field and rock breaking characteristics of the bionic PDC cutter in rotating state[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2): 71-77.
- [12] Liu W J, Deng K C, Yang F L, et al. An experimental and numerical investigation on rock cutting behavior of specially-shaped PDC cutter[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,

- 2024,38(1):285-298.
- [13] Zhu X H, Luo Y X, Liu W J, et al. Rock cutting mechanism of special-shaped PDC cutter in heterogeneous granite formation [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022,210: 110020.
- [14] 冯云春. 龙凤山气田火山岩地层个性化PDC钻头设计与应用[J]. 钻探工程, 2024,51(2):94-101.
FENG Yunchun. Design and application of personalized PDC bit for volcanic rock formation in Longfengshan Gas Field[J]. Drilling Engineering, 2024,51(2):94-101.
- [15] 陈新海. 巴彦套新区异形齿PDC钻头研究与应用[J]. 钻探工程, 2022,49(5):127-135.
CHEN Xinhai. Research and application of special-shaped tooth PDC bits in Bayanhetao New Area[J]. Drilling Engineering, 2022,49(5):127-135.
- [16] 吴泽兵, 袁若飞, 张文溪, 等. 锯形PDC齿破岩与温度特性数值模拟研究[J]. 石油机械, 2024,52(1):29-37,44.
WU Zebing, YUAN Ruofei, ZHANG Wenxi, et al. Numerical simulation on rock-breaking and temperature characteristics of sawtooth PDC cutter [J]. China Petroleum Machinery, 2024,52(1):29-37,44.
- [17] 颜辉, 李宁, 阳君奇, 等. 砾石层异型齿PDC钻头的设计及现场试验[J]. 钻采工艺, 2023,46(3):9-15.
YAN Hui, LI Ning, YANG Junqi, et al. Design and field test of special-shaped cutter PDC bit in gravel layer[J]. Drilling & Production Technology, 2023,46(3):9-15.
- [18] 罗鸣, 朱海燕, 刘清友, 等. 一种适用于超高温超高压塑性泥岩的V形齿PDC钻头[J]. 天然气工业, 2021,41(4):97-106.
LUO Ming, ZHU Haiyan, LIU Qingyou, et al. A V-cutter PDC bit suitable for ultra-HTHP plastic mudstones[J]. Natural Gas Industry, 2021,41(4):97-106.
- [19] Rahmani R, Bradford J, Barocio H. New drill bit technology Sets drilling records in carbonates and harsh rock applications [C]//Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi, UAE, 2016; SPE-183397-MS.
- [20] Rahmani R. Rock customized shaped cutters improve rock cutting efficiency[C]//Paper presented at the SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition. The Hague, The Netherlands, 2019; SPE-194148-MS.
- [21] Sugiura J, Lopez R, Borjas F, et al. Oil and gas drilling optimization technologies applied successfully to unconventional geothermal well drilling [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dubai, UAE, 2021; SPE-205965-MS.
- [22] Rahmani R, Pastusek P, Yun G, et al. Investigation of PDC cutter structural integrity in hard rocks [J]. SPE Drilling & Completion, 2021,36(1):11-28.
- [23] 李彦操. PDC钻头齿的破岩机理和性能测试方法研究现状[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023,43(5):553-567.
LI Yanco. Research status on rock-breaking mechanism and performance testing methods of PDC bit cutters [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023,43(5):553-567.
- [24] 刘维, 高德利. 大齿快切PDC钻头提速研究与现场试验[J]. 天然气工业, 2022,42(9):102-110.
LIU Wei, GAO Deli. Research and field test of large-tooth and rapid-cutting PDC bit for ROP enhancement [J]. Natural Gas Industry, 2022,42(9):102-110.
- [25] 刘永旺, 李坤, 管志川, 等. 降低井底岩石抗钻能力的钻速提高方法研究及钻头设计[J]. 石油钻探技术, 2024,52(3):11-20.
LIU Yongwang, LI Kun, GUAN Zhichuan, et al. Research on the method of improving ROP and designing drill bits to mitigate drillability of bottomhole rocks [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024,52(3):11-20.
- [26] 汤凤林, 赵荣欣, Нескоромных В. В., 等. 新型耐磨损ONYX切削具制作的PDC钻头[J]. 钻探工程, 2024,51(3):111-117.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, Neskormnyh V. V., et al. PDC drill bit made of new wear-resisting cutting elements ONYX [J]. Drilling Engineering, 2024,51(3):111-117.
- [27] 张春亮, 王锦成, 柯晓华, 等. 磨损齿PDC钻头的切削性能试验[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023,43(1):35-42.
ZHANG Chunliang, WANG Jincheng, KE Xiaohua, et al. Experimental study on working mechanics of PDC bit with worn teeth [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023,43(1):35-42.
- [28] 任雷, 祁任泽, 何胜煜, 等. 圆柱形PDC切削齿磨损对钻井工艺规程的影响[J]. 石油矿场机械, 2024,53(5):1-5.
REN Lei, QI Renze, HE Shengyu, et al. Effect of wear of cylindrical PDC cutting teeth on drilling process [J]. Oil Field Equipment, 2024,53(5):1-5.

(编辑 王跃伟)