

横振钻井模式下 PDC 钻头切削齿工作角度计算^{*}

杨立 杨迎新 林敏

(西南石油大学机电工程学院)

杨立等.横振钻井模式下 PDC 钻头切削齿工作角度计算.天然气工业,2008,28(3):72-74.

摘要 PDC 钻头切削齿的切削载荷与齿的切削工作角度有直接而密切的关系,所以正确地分析和计算齿的切削角度,是齿的切削载荷以及钻头工作载荷分析的基础和前提。对横振钻井模式下 PDC 钻头切削齿的切削角度作了严格的定义,利用空间解析几何以及向量分析的数学理论和方法,推导出齿刃轮廓线上任意点的前倾角和刃倾角的计算公式,分析和探讨了钻头的横向运动速度对 PDC 齿切削工作角度的影响规律。

关键词 钻井工程 PDC 钻头 切削 前倾角 刃倾角 横向运动

迄今为止,已发表的文献中所介绍的 PDC 钻头切削齿工作角度的计算公式均是以理想钻井条件(即钻头中心与井眼中心相重合的匀转速、匀钻速钻进)为基本假设推出的^[1-4]。然而,PDC 钻头的实际工作条件与理想钻井条件是有差别的。由于井眼直径通常大于钻头直径,所以钻头在旋转钻井的过程中往往会同时发生横向运动或横向振动(即垂直于井眼中心线方向的运动或振动),有时这种横向振动甚至会达到相当剧烈的程度,钻头的“回旋”现象就是这种横向振动的典型代表。横向振动会对钻头的破岩效率和工作寿命造成显著影响。因此,研究钻头在横振工作模式下的切削载荷规律是很有意义的,这就需要首先掌握横振工作模式下 PDC 钻头齿切削角度的计算方法。

一、切削角度的定义

1. 切削运动的分解与合成

PDC (Polycrystalline Diamond Compact) 钻头齿在横振模式下的切削运动是切向运动与横向运动的复合运动,切削运动速度也就是切向运动与横向运动速度的矢量和。如图 1 所示, $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 为切削齿的位置坐标系, $O_1 X_1 Z_1$ 平面通过钻头中心轴线。齿的横向运动发生在 $O_1 X_1 Z_1$ 平面之内,且与钻头轴线相垂直。齿的切向运动是无横向运动时的主切削运动,切向运动的方向垂直于 $O_1 X_1 Z_1$ 平面。切

向运动与横向运动是两个相互正交、相互独立的运动。因此,可以采用矢量分解与叠加的方法进行横振钻进模式下的运动分析。

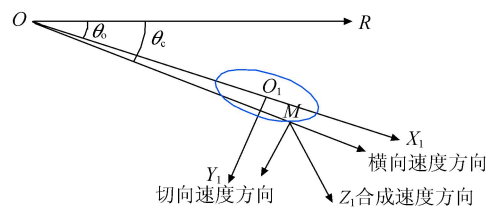


图 1 在位置坐标系下的速度矢量图

2. 参考平面

从切削学的角度看,PDC 钻头齿对井底岩石的切削实际上属于曲刃的斜切削问题,曲刃上每点的切削角度是不同的。因此,切削角度应针对齿刃上的点进行定义。切削齿的聚晶金刚石圆形表面为其工作平面,相当于金属切削刀具的前刀面;复合片的圆柱面与岩石相对的部分就相当于金属切削刀具的后刀面;切削刃就是齿的金刚石圆形轮廓线;井底上的环形切削沟槽表面就是切削表面。根据金属切削学中的基本概念,对于 PDC 钻头齿切削刃上的点 M ,可以相应地定义出描述切削角度的参考平面(见图 2 所示)。^①工作平面(P_w):切削齿工作面所在的平面;^②切削平面(P_s):经过点 M ,与切削后的岩石表面相切的平面;^③基面(P_r):经过点 M ,与切削齿在 M 点处的合成运动速度(主切削速度与横向运动

^{*} 本文受到国家自然科学基金项目(编号:90410004,50774066)以及四川省高校重点实验室“岩石破碎学与钻头实验室”开放基金项目“PDC 钻头结构与力学性能关系研究”的资助。

作者简介: 杨立,1981年生,硕士;从事岩石破碎学及油气井钻头技术领域的工作。地址:(637001)四川省南充市油院路30号西南石油大学钻头研究所。电话:(0817)2642702,13980319799。E-mail:yangyingxin@swpu.edu.cn;yangyx36@163.com

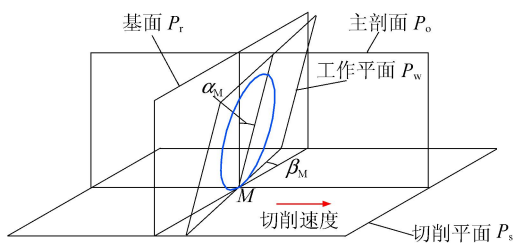


图2 PDC齿切削角度的参考平面图

速度的合成)方向相垂直的平面;④主剖面(\$P_o\$):经过点 \$M\$,且同时垂直于切削平面和基面的平面。

3.前倾角和刃倾角

(1)前倾角(\$\alpha_M\$):前倾角为工作平面与基面在主剖面内的交线的夹角。

(2)刃倾角(\$\beta_M\$):刃倾角为工作平面与基面在切削平面内的交线的夹角。

二、切削角度的计算

1.单一切向运动条件下的参考平面方程

在切削齿的位置坐标系 \$O_1 X_1 Y_1 Z_1\$ 下,基面的法向量 \$\vec{V}_{b1} = [\sin(\varrho - \theta), \cos(\varrho - \theta), 0]\$, 切削平面的法向量 \$\vec{V}_{s1} = [\cos(\varrho - \theta), -\sin(\varrho - \theta), -k_M]\$, 主剖面的法向量 \$\vec{V}_{o1} = [\cos(\varrho - \theta), -\sin(\varrho - \theta), \frac{1}{k_M}]\$; 根据钻头几何学基本方程^[3], 可以得到工作平面法向量 \$\vec{V}_w = [m, n, p]\$。其中 \$\gamma, \alpha, \beta, \delta\$ 分别是切削齿的法向角, 前倾角、侧转角和齿刃轮廓线上 \$M\$ 点的位置角; \$\varrho\$ 为切削齿中心点的周向角; \$\theta\$ 为点 \$M\$ 处的周向角; \$k_M\$ 为 \$M\$ 点处的切线斜率。

$$\begin{cases} m = \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ n = \cos \alpha \cos \beta \\ p = \sin \alpha \cos \gamma - \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma \\ k_M = \frac{k_{1,M}(R_c + x_0) + k_{2,M}y_0}{k_{3,M} \sqrt{(R_c + x_0)^2 + y_0^2}} \\ k_1 = r_c (\cos \hat{\alpha} \cos \beta \cos \gamma + \sin \hat{\alpha} \sin \beta \cos \gamma - \sin \hat{\alpha} \cos \alpha \sin \gamma) \\ k_2 = r_c (\sin \hat{\alpha} \sin \alpha \cos \beta - \cos \hat{\alpha} \sin \beta) \\ k_3 = -r_c (\cos \hat{\alpha} \cos \beta \sin \gamma + \sin \hat{\alpha} \cos \alpha \cos \gamma + \sin \hat{\alpha} \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma) \end{cases} \quad (1)$$

式中: \$(x_0, y_0, z_0)\$ 为 \$M\$ 点在切削齿位置坐标系 \$O_1 X_1 Y_1\$ 中的坐标, \$k_{1,M}, k_{2,M}, k_{3,M}\$ 分别为 \$(x_0, y_0, z_0)\$ 点对应的位置角 \$(\hat{\alpha}_M)\$ 所得到的 \$k_1, k_2\$ 和 \$k_3\$。

2.单一横向运动条件下的参考平面方程

切向运动和横向运动的方向相互正交,故单一

横向运动条件下的参考平面方程可通过旋转变换的方法获得。在切削齿位置坐标系中,横向运动的方向是切向运动方向在平行于位置坐标系 \$X_1 O_1 Y_1\$ 的平面上沿 \$Z_1\$ 轴逆时针旋转 \$90^\circ\$, 相应的基面、切削平面和主剖面的法向量也沿 \$Z_1\$ 轴逆时针方向旋转 \$90^\circ\$。齐次变换矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由此可得单一横向运动条件下各参考平面的法向量:基面的法向量 \$\vec{V}_{b1} = \vec{V}_{b1} \times T = [\cos(\varrho - \theta), -\sin(\varrho - \theta), 0]\$; 主剖面的法向量 \$\vec{V}_{o2} = \vec{V}_{o1} \times T = [-\sin(\varrho - \theta), -\cos(\varrho - \theta), \frac{1}{k_M}]\$; 切削平面的法向量 \$\vec{V}_{s2} = \vec{V}_{s1} \times T = [-\sin(\varrho - \theta), -\cos(\varrho - \theta), -k_M]\$。

3.求合成运动的参考平面的法向量

向量的合成不仅与向量的方向相关,同时也与向量的模的大小相关。法向量的模的大小由横向速度和切向速度的大小决定。因此,我们需要对上面得到的法向量进行修正。设横向速度和切向速度的大小的比值为 \$\alpha\$, 修正后单一横向运动的基面的法向量为 \$[x, y, z]\$, 由向量平行的性质可以得出:

$$\begin{cases} x = \alpha \cos(\varrho - \theta) \\ y = -\alpha \sin(\varrho - \theta) \\ z = 0 \end{cases} \quad (3)$$

即修正后的单一横向运动的基面的法向量为: \$\vec{V}_{b3} = [\alpha \cos(\varrho - \theta), -\alpha \sin(\varrho - \theta), 0]\$。

同理,可推算出修正后的主剖面的法向量为: \$\vec{V}_{o3} = [-\alpha \sin(\varrho - \theta), -\alpha \cos(\varrho - \theta), \frac{1}{k_M} \alpha]\$; 修正后的切削平面的法向量为: \$\vec{V}_{s3} = [-\alpha \sin(\varrho - \theta), -\alpha \cos(\varrho - \theta), -k_M \alpha]\$。于是,合成运动的参考平面的法向量分别为:

基面: \$\vec{V}_b = \vec{V}_{b1} + \vec{V}_{b3} = [\sin(\varrho - \theta) + \alpha \cos(\varrho - \theta), \cos(\varrho - \theta) - \alpha \sin(\varrho - \theta)]\$;

主剖面: \$\vec{V}_o = \vec{V}_{o1} + \vec{V}_{o3} = [\cos(\varrho - \theta) - \alpha \sin(\varrho - \theta), -\sin(\varrho - \theta) - \alpha \cos(\varrho - \theta), \frac{1}{k_M} + \frac{1}{k_M} \alpha]\$;

切削平面: \$\vec{V}_s = \vec{V}_{s1} + \vec{V}_{s3} = [\cos(\varrho - \theta) - \alpha \sin(\varrho - \theta), -\sin(\varrho - \theta) - \alpha \cos(\varrho - \theta), -k_M - k_M \alpha]\$。

4. 参考平面的交线的方向矢量

主剖面与工作基面的交线的方向矢量为:

$$\vec{V}_{t,b} = \vec{V}_t \times \vec{V}_s$$

主剖面与工作平面的交线的方向矢量为:

$$\vec{V}_{t,w} = \vec{V}_t \times \vec{V}_w$$

切削平面与工作基面的交线的方向矢量为:

$$\vec{V}_{s,b} = \vec{V}_s \times \vec{V}_b$$

切削平面与工作平面的交线的方向矢量为:

$$\vec{V}_{s,w} = \vec{V}_s \times \vec{V}_w$$

5. 切削齿在 M 点的前倾角和刃倾角计算式

切削齿在 M 点的前倾角 (α_M) 即是 $\vec{V}_{t,w}$ 与 $\vec{V}_{t,b}$ 之夹角。根据向量夹角的计算式, 可得:

$$\alpha_M = \arccos = \frac{|\vec{V}_{t,w} \times \vec{V}_{t,b}|}{|\vec{V}_{t,w}| |\vec{V}_{t,b}|} \quad (4)$$

切削齿在 M 点的刃倾角 β_M 即是矢量 $\vec{V}_{t,w}$ 与 $\vec{V}_{s,b}$ 之夹角。根据向量夹角的计算式, 可得:

$$\beta_M = \arccos = \frac{|\vec{V}_{t,w} \times \vec{V}_{s,b}|}{|\vec{V}_{t,w}| |\vec{V}_{s,b}|} \quad (5)$$

三、横向速度对切削角度的影响规律

由作图的方法可确定横坐标为齿刃上点的位置角, 纵坐标为切削角度。切削齿直径为 19.05 mm, 齿的前倾角为 5° ; 侧倾角为 15° ; 法向角为 4° ; 齿在钻头上的径向位置为 50 mm; 旋转速度为 60 r/min; 横向速度分别为 0、0.5、1、1.5、2、3 m/s。由分析可以得出以下规律: ①随着横向速度的逐渐增大, 前倾角和刃倾角都随之显著增大, 说明横向速度对齿的切削角度有着显著的影响。②在横向速度相同的条件

下, 切削刃上的前倾角增大时, 刃倾角减小; 刃倾角增大时, 前倾角减小。这与无横向运动时的规律在趋势上是一致的^[1-3]。③位置角为 0° 附近的区域, 横向速度对前倾角变化的敏感度低, 离开该点越远, 前倾角受横向速度变化的影响越大; 相反, 位置角为 0° 附近的区域, 横向速度对刃倾角变化更为敏感, 离开该点越远, 敏感度降低。④随着横向速度的增大, 不同横向速度下的前倾角和刃倾角的变化幅度越来越不明显, 即趋于稳定的区域越大。

四、结 论

通过严格的数学推导, 得到了横振钻井模式下 PDC 钻头齿刃轮廓线上任意点的前倾角和刃倾角的计算式。分析过程严谨、合理, 结果正确; 利用计算公式, 针对实际的钻头参数, 研究了横向速度的大小对 PDC 钻头齿切削角度的影响规律。结果表明, 钻头的横向运动对齿的切削工作角度的影响是相当显著的。该研究结果为开展复杂运动条件下 PDC 钻头的切削性能分析提供了必不可少的重要基础。

参 考 文 献

- [1] 李树盛, 马德坤, 侯季康. PDC 切削齿工作角度的精确计算与分析[J]. 西南石油学院学报, 1996, 18(4): 67-72.
- [2] 李树盛, 马德坤, 侯季康. PDC 钻头几何学研究[J]. 西南石油学院学报, 1996, 18(2): 82-86.
- [3] 杨迎新. PDC 钻头切削力学研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2003.
- [4] 何玉宁. 计算机图形学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

(收稿日期 2007-12-11 编辑 钟水清)