◀钻井技术与装备▶

基于着色法的PDC钻头切削面积计算方法研究*

邓秀丽 周春晓 任海涛 赵家辉 何 佳 刘 磊
（西南石油大学机电工程学院）

邓秀丽，周春晓，任海涛，等. 基于着色法的PDC钻头切削面积计算方法研究［J］. 石油机械，2026，54（10）：12-19.

Deng Xiuli，Zhou Chunxiao，Ren Haitao，et al. A coloring-based cutting area calculation method for PDC bits［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（10）：12-19.

摘要：PDC钻头是钻井工程中重要的破岩工具，在软硬交替、含砾石及复合地层中，其钻进效能常受切削齿载荷分布不均的影响，易出现环切、掏心等失效问题。切削区域分析和切削面积计算是钻头工作载荷分析的基础，但传统建模方法在复杂切削状态下存在建模效率低、过程烦琐等问题。为给钻头布齿优化与性能提升提供理论依据，提出了一种基于着色法的PDC钻头切削面积快速计算方法。该方法建立单齿在钻头空间坐标系下的齿刃轨迹方程，利用MATLAB绘制各切削齿的切削区域图像，并将当前齿当前圈、上一圈及前后相邻齿的区域分别标记为红、黑、白3种颜色；再结合像素级分类与灰度值转换，统计对应颜色像素数量，实现切削区域的自动识别与面积计算。为提高计算精度，引入侵入深度和切削顺序等关键参数，并通过图像叠加识别径向投影平面上各齿间的真实切削重叠区域。以直径215.9 mm、主切削齿数为19的PDC钻头为算例与传统数值积分法进行对比。研究结果表明：2种方法的计算结果在各齿切削面积分布规律上具有较高一致性，整体相对误差控制在5%以内；该方法能够更真实地反映PDC钻头单齿的实际切削区域，具备计算过程简洁、可视化表达直观等优势，在保证结果合理性的同时显著提升了建模与分析效率。所得结论可为PDC钻头的切削性能定量评价、磨损趋势分析及布齿参数优化提供一条可行的技术路径。

关键词：PDC钻头；着色法；切削区域；切削面积；侵入深度；像素级分类
中图分类号：TE921 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202509003

A Coloring-Based Cutting Area Calculation Method for PDC Bits

Deng Xiuli Zhou Chunxiao Ren Haitao Zhao Jiahui He Jia Liu Lei
（*School of Mechanical Engineering*，*Southwest Petroleum University*）

Abstract：PDC bit is an important rock-breaking tool in drilling engineering. However，in soft-hard alternating，gravel-bearing，and composite formations，its drilling efficiency is often affected by uneven load distribution on cutters，which readily causes failure modes such as ring cutting and core pulling. Cutting-region analysis and cutting-area calculation are fundamental for bit working-load analysis，but traditional modeling methods suffer from low efficiency and cumbersome procedures under complex cutting conditions. To provide a theoretical basis for bit cutter arrangement optimization and performance improvement，a rapid cutting-area calculation method for PDC bits based on the coloring technique was proposed. For this method，the tooth-edge trajectory equation of a single cutter in the bit spatial coordinate system is established，MATLAB is used to plot the cutting-region image

* 基金项目：国家科技重大专项“高功率毫米波-钻头复合破岩钻井技术”（2025ED10）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

of each cutter, and the regions of the current cutter on the current and previous rows, and of the adjacent cutters are separately marked with red, black, and white. Through pixel-level classification and grayscale value conversion, the number of pixels for each color is counted to achieve automatic identification and area calculation of the cutting regions. To improve calculation accuracy, key parameters such as penetration depth and cutting sequence are introduced, and image superposition is used to identify the actual cutting overlap regions between cutters on the radial projection plane. Taking a ϕ215.9 mm PDC bit with 19 primary cutters as an example, the proposed method was compared with the traditional numerical integration method, indicating a good consistency in the cutting-area distribution pattern of each cutter, with an overall relative error controlled within 5%. The research results demonstrate that the proposed method can more realistically reflect the actual cutting region of each single cutter of the PDC bit, featuring a concise calculation process and intuitive visual representation. While ensuring the rationality of the results, it significantly improves modeling and analysis efficiency, providing a feasible technical approach for quantitative evaluation of cutting performance, wear trend analysis, and cutter arrangement optimization of PDC bits.

Keywords: PDC bit; coloring method; cutting-region; cutting-area; penetration depth; pixel-level classification

0　引　言

聚晶金刚石复合片（polycrystalline diamond compact，PDC）钻头是目前钻井工程中重要的破岩工具，具有破岩效率高、安全性好、使用寿命长等优势[1-2]，其年进尺量已占总进尺数的90%以上[3-5]。切削齿（也称“复合片齿”）是PDC钻头的主要切削单元，其齿面上切削区域的位置、大小和形态直接影响切削载荷幅值和应力分布状态。因此，准确计算切削面积对钻头破岩效率评价、使用寿命预测、个性化布齿设计及钻井参数优化等具有重要意义。

近年来，国内学者[6-8]针对PDC钻头切削齿齿面切削区域特征及切削面积的精确计算开展了大量研究，逐步形成了从几何建模到数值仿真的系统分析方法。早期研究多基于空间几何建模原理，通过建立刀具与岩石相对运动的切削轨迹方程，并利用微元积分方法实现切削面积计算。该方法建模思路清晰、物理意义明确，能够较为直观地反映切削过程的几何特征，但计算效率较低，且切削区域的微元划分方式对计算精度影响较大。随后，学者们[9]基于切削截面形成原理提出了等角度扇形微元划分方法，通过优化微元划分策略有效提升了切削面积计算精度，但计算量仍较大，难以满足复杂工况下的快速求解需求。随着计算机技术与数值分析手段的不断发展，有限元方法逐渐被引入切削过程分析中[10-12]，通过合理的网格划分与边界条件设定，可显著提高计算精度与计算自动化程度。然而，该方法对网格尺寸与形状、计算资源依赖较强，建模复杂、计算量大，在工程应用中仍存在一定局限。在此基础上，研究者们[13-14]进一步从钻头整体运动特性出发，结合切削齿的空间布局特征与相对运动规律，对各齿的切削深度、切削平面及切削弧长进行分析与精确计算，进而揭示了齿间切削协调性与受力分布规律[15-16]。部分研究[17]采用基于几何特征的数值方法，如零点遍历与等角度离散策略，对切削弧长、切削面积和切削体积进行了高精度求解，显著提高了计算稳定性与适用性；也有学者[18-19]建立了通用切削面积函数与力学模型，实现了对不同切削形态及载荷特征的统一描述。随着数值仿真技术的不断发展，三维几何建模与数字化钻头-岩石相互作用模型被广泛应用[20-21]，用于重构井底结构[22]、量化切削齿的有效接触面积，并探讨切削力与切削面积之间的耦合关系，进一步提升了模型的物理真实性与预测精度。

现有研究虽已取得一定成果，但传统微元法与数值积分法存在建模过程复杂、计算量大等问题，不利于实现快速计算，而有限元方法在处理切削面积问题时又易造成计算资源浪费。针对上述问题，笔者提出了一种基于着色法的多因素切削面积快速计算方法。该方法综合考虑了侵入深度与切削顺序对切削面积的影响，通过绘制各切削齿的切削区域图像，结合像素级分类与灰度值转换，实现对单齿切削区域的精确识别与面积的快速计算。该方法能够高效提取有效切削面积，在保证计算精度的同时显著提升计算效率。所得结论可为PDC钻头的布齿优化和性能评估提供一条高效可行的技术路径。

1　切削区域分析

1.1　单齿切削区域计算

在钻头空间坐标系中，单个切削齿的空间位置可由其定位半径R_c、定位高度H_c和周向角θ_c确定。为进一步描述切削齿在钻头旋转过程中的空间姿态，须综合考虑装配角γ、侧倾角β和前倾角α等姿态参数对齿面朝向的影响。基于此，笔者建立了如图1所示的单齿空间坐标系，用以描述单个切削齿在空间中的位置与姿态。

在切削齿基本坐标系$O_1x_1y_1z_1$（切削齿工作平面）内，切削齿齿刃轨迹为圆，其上任意一点P的坐标$(x_1,\ y_1,\ z_1)$满足参数方程：

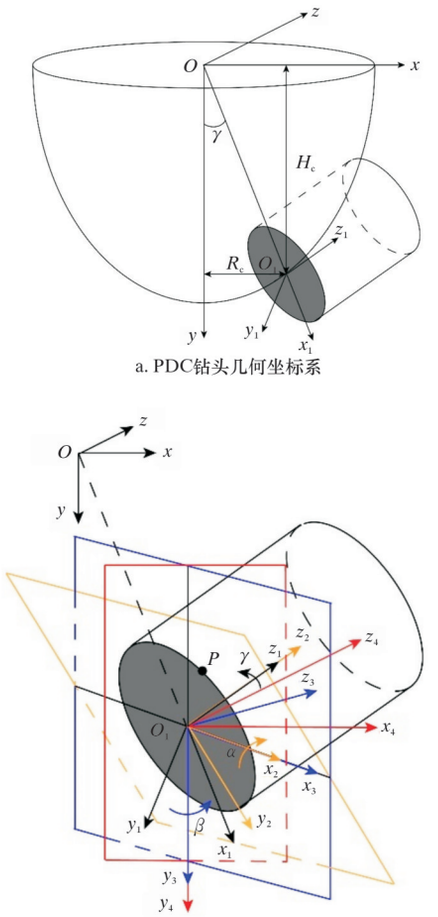
$$x_1 = c_1 + r\boldsymbol{a}_1\cos\theta + r\boldsymbol{b}_1\sin\theta \tag{1}$$

$$y_1 = c_2 + r\boldsymbol{a}_2\cos\theta + r\boldsymbol{b}_2\sin\theta \tag{2}$$

$$z_1 = c_3 + r\boldsymbol{a}_3\cos\theta + r\boldsymbol{b}_3\sin\theta \tag{3}$$

式中：c_1、c_2、c_3为圆心坐标，$c_1=c_2=c_3=0$，mm；r为圆半径，mm；θ为圆周上的位置角度，rad，$\theta\in[0,\ 2\pi]$；$\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{b}$为与法向量$\boldsymbol{n}$垂直且相互垂直的单位向量，无量纲。

将切削齿基本坐标系$O_1x_1y_1z_1$绕O_1z_1轴旋转装配角$-\gamma$角度，坐标系旋转至$O_1x_2y_2z_2$，其旋转矩阵为$\boldsymbol{M}_1$；再将$O_1x_2y_2z_2$绕O_1x_2轴旋转前倾角$-\alpha$角度，坐标系旋转至$O_1x_3y_3z_3$，其旋转矩阵为$\boldsymbol{M}_2$；再将$O_1x_3y_3z_3$绕O_1y_3轴旋转侧倾角$-\beta$角度，坐标系旋转至切削齿位置坐标系$O_1x_4y_4z_4$，其旋转矩阵为$\boldsymbol{M}_3$；再将切削齿位置坐标系$O_1x_4y_4z_4$沿定位半径和定位高度平移变换到钻头空间坐标系$Oxyz$，其平移变换矩阵为$\boldsymbol{M}_4$。则齿刃上任意点$P(x_1,\ y_1,\ z_1)$在钻头空间坐标系中的表达式为：



a. PDC钻头几何坐标系

b. 单齿坐标系

图1　单齿空间坐标系

Fig. 1　Single-cutter spatial coordinate system

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\ \boldsymbol{y}\\ \boldsymbol{z}\\ 1\end{bmatrix} = \boldsymbol{M}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_1\\ \boldsymbol{y}_1\\ \boldsymbol{z}_1\\ 1\end{bmatrix} \tag{4}$$

其中变换矩阵$\boldsymbol{M}$为：

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{M}_4\boldsymbol{M}_3\boldsymbol{M}_2\boldsymbol{M}_1 \tag{5}$$

即有：

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix}\cos\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma,\ \cos\beta\sin\gamma - \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma,\ \cos\alpha\sin\beta,\ R_c\cos\theta_c\\ -\cos\alpha\sin\gamma,\ \cos\alpha\cos\gamma,\ \sin\alpha,\ R_c\sin\theta_c\\ \sin\alpha\cos\beta\sin\gamma - \sin\beta\cos\gamma,\ -\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\beta\cos\gamma,\ \cos\alpha\cos\beta,\ H_c\\ 0,\ 0,\ 0,\ 1\end{bmatrix} \tag{6}$$

将式（1）~式（3）及式（6）代入式（4）可得齿刃上任意点$P(x_1,\ y_1,\ z_1)$在钻头空间坐标系中的表达为：

$$x = x_1(\cos\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma) + y_1(\cos\beta\sin\gamma - \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma) + z_1\cos\alpha\sin\beta + R_c\cos\theta_c \tag{7}$$

$$y = -x_1\cos\alpha\sin\gamma + y_1\cos\alpha\cos\gamma + z_1\sin\alpha + R_c\sin\theta_c \tag{8}$$

$$z = x_1(\sin\alpha\cos\beta\sin\gamma - \sin\beta\cos\gamma) + y_1(-\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\beta\cos\gamma) + z_1\cos\alpha\cos\beta + H_c \tag{9}$$

采用同样的方法，可依次建立各切削齿在钻头空间坐标系中的表达式。

1.2　多齿切削区域分析

在实际钻进过程中，PDC钻头各切削齿的齿面并非全部参与切削。相邻切削齿的运动轨迹在空间上存在一定程度的重叠，单个切削齿仅有部分齿面与岩石发生实际接触并参与有效切削。笔者所述的“切削区域”特指齿面上实际参与切削

的有效接触区域。图2为齿面工作区域。由图2可知，阴影部分即为齿面切削区域；其下边界由当前切削齿在钻头旋转过程中形成的齿刃运动轨迹构成，其余边界则由前后相邻齿的齿刃轨迹及当前齿在上一圈中形成的齿刃轨迹共同限定。所谓“前后相邻齿”，指在径向布齿图上按半径顺序与当前齿相邻的2个齿，即几何意义上的相邻齿，而非切削顺序上的相邻齿。

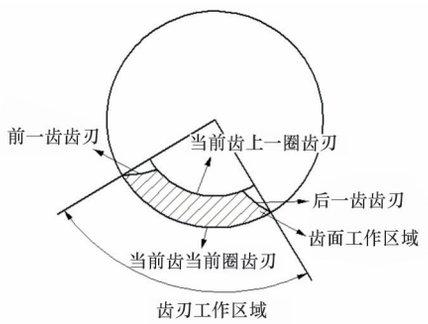


图2　齿面工作区域

Fig. 2　Working area of the cutter face

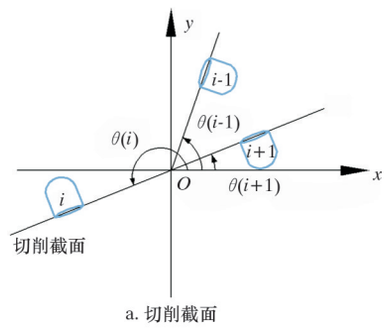
决定齿面切削区域的因素有：①当前齿及前后相邻齿的尺寸和轮廓形状，②当前齿及前后相邻齿的空间位置，③钻头的侵入深度。

从钻头冠部沿轴向俯视，规定逆时针方向为正。在某一固定截面N上，当钻头绕自身轴线逆时针旋转一周时，其上所有切削齿将按照一定顺序经过该截面，从而在截面N上的井底岩石形成确定的切削痕迹。当钻头再次完成1周旋转并伴随轴向钻进一定深度时，截面N处的岩石将再次被切削，形成与前一周相似的切削轨迹。其在截面N上形成的切削截面形状如图3a所示。由此，钻头在单次旋转过程中所切削的岩石体积可等效为一个曲边多边形绕钻头轴线旋转1周所扫掠的体积，该体积被定义为“切削环”[13]，如图3b所示。

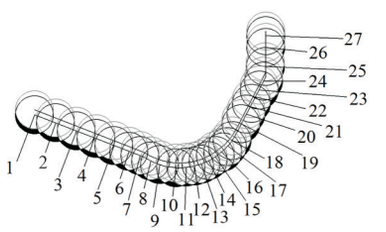
2　基于着色法的切削面积计算

2.1　着色法原理

着色法是一种基于图像颜色分区的面积计算方法，其基本思想是通过颜色标识不同区域，再由各色像素点的数量计算其对应的物理面积。笔者采用的色彩编码基于RGB（红-绿-蓝）模式，将不同切削齿赋予不同的颜色标签，如图4所示。通过图像处理获取特定颜色区间像素总数，从而实现对单齿切削面积的快速计算。



a. 切削截面



b.切削环示意图

图3　切削截面与切削环示意图

Fig. 3　Cutting section and cutting rings

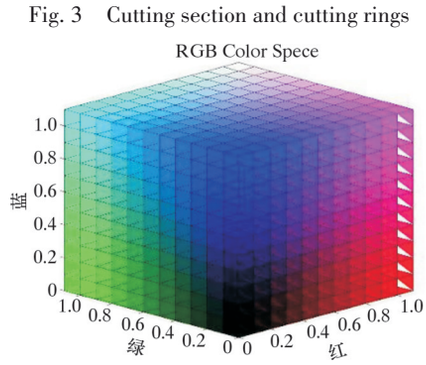


图4　三色混合成色图

Fig. 4　RGB coloring diagram

为简化RGB三通道颜色筛选操作，采用灰度处理方法对图像进行归一化处理，实现从RGB三维空间到灰度一维空间的投影映射，其数学表达为：

$$G(x,y)=0.299R(x,y)+0.587G(x,y)+0.114B(x,y) \tag{10}$$

式中：$(x,\ y)$为像素点的位置，$G(x,\ y)$为像素点$(x,\ y)$处的灰度值，R、G、B分别为该点的红、绿、蓝通道值。

为识别不同区域像素，设置2个灰度阈值$T_1=30$，$T_2=100$，将像素划分为3类：

$$\text{label}(G(x,y))=\begin{cases}\text{黑色} & 0\leqslant G(x,y)<T_1\\ \text{红色} & T_1\leqslant G(x,y)<T_2\\ \text{白色} & G(x,y)\geqslant T_2\end{cases} \tag{11}$$

黑色像素点的个数：

$$N_{\text{black}}=\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}l[0,T_1)(G(x,y)) \tag{12}$$

式中：N_{black}为黑色像素点个数，无量纲。

红色像素点个数：

$$N_{\mathrm{red}}=\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}l[T_1,T_2)(G(x,y)) \tag{13}$$

式中：N_{red}为红色像素点个数，无量纲。

$l_{\mathrm{A}}(z)$为单位阶跃函数（A为灰度值区间）：

$$l_{\mathrm{A}}(z)=\begin{cases}1 & z\in A\\ 0 & z\notin A\end{cases} \tag{14}$$

通过统计特定颜色像素点个数，可获得其对应的图像区域面积，以实现切削齿工作区域面积的快速计算。

2.2　切削面积计算

针对切削环面积的计算，众多学者常采用微元积分法[6-9]，但该方法计算过程复杂、耗时较长。笔者基于着色法原理，在齿刃轨迹数学模型的基础上，为各齿刃赋予独立颜色标签，通过图像处理统计特定颜色像素数量，实现切削区域的快速识别与面积计算。

绘制图像时，采用统一的颜色标记策略：当前齿当前圈区域标记为红色，上一圈区域标记为黑色，前后相邻齿的所有区域标记为白色。基于该标记规则，绘制出齿刃轨迹，如图5所示。

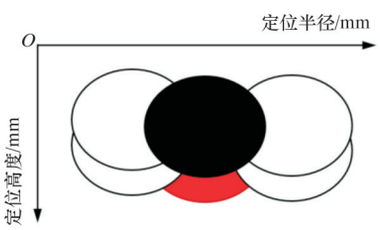


图5　着色法标记的单齿切削区域

Fig. 5　Single-cutter cutting region marked by the coloring method

切削面积计算包括坐标变换建模、图像着色绘制、灰度与二值化处理、面积计算与循环迭代。

其中，面积计算式如下：

$$A_{\mathrm{red}}=\frac{N_{\mathrm{red}}}{N_{\mathrm{black}}}\pi r^2 \tag{15}$$

式中：A_{red}为当前齿切削面积，mm^2。

为确保切削面积计算的全面性和准确性，在建模时还须引入侵入深度和切削顺序2个关键因素[23-24]。

（1）侵入深度。侵入深度h是指钻头每转1圈沿轴向推进的深度，它决定了切削齿与岩石的纵向接触高度，直接影响切削面积大小[25]。其计算公式为：

$$h=\frac{1\,000v}{60n} \tag{16}$$

式中：h为侵入深度，mm；v为钻速，m/h；n为转速，r/min。

由于各齿的周向位置不同，其切削行为在时间上存在先后顺序，导致相邻齿的位置通过截面N时存在高度差异[13]。故需根据周向角差异对相邻齿的侵入深度进行修正：

$$h_{\mathrm{c}}=h \tag{17}$$

$$h_{\mathrm{p}}=\left(1-\frac{\theta_{\mathrm{c}}^{i-1}-\theta_{\mathrm{c}}^{i}}{2\pi}\right)h_{\mathrm{c}} \tag{18}$$

$$h_{\mathrm{a}}=\left(1-\frac{\theta_{\mathrm{c}}^{i+1}-\theta_{\mathrm{c}}^{i}}{2\pi}\right)h_{\mathrm{c}} \tag{19}$$

式中：h_{c}为第i号齿当前侵入深度，mm；h_{p}为上一齿的侵入深度，mm；h_{a}为下一齿的侵入深度，mm；θ_{c}^{i}为当前齿周向角，rad；$\theta_{\mathrm{c}}^{i-1}$为上一齿周向角，rad；$\theta_{\mathrm{c}}^{i+1}$为下一齿周向角，rad。

当前齿及其相邻齿在上一圈通过截面N时的侵入深度为：

$$h_{\mathrm{c}}^{i-1}=(H_{\mathrm{c}}^{i-1}-H_{\mathrm{c}}^{i})+h_0+h_{\mathrm{p}} \tag{20}$$

$$h_{\mathrm{c}}^{i}=h_0+h_{\mathrm{c}} \tag{21}$$

$$h_{\mathrm{c}}^{i+1}=(H_{\mathrm{c}}^{i+1}-H_{\mathrm{c}}^{i})+h_0+h_{\mathrm{a}} \tag{22}$$

式中：h_0为当前齿上一圈通过截面N时的侵入深度，mm；h_{c}^{i-1}为第$i-1$号齿当前侵入深度，mm；h_{c}^{i}为第i号齿当前侵入深度，mm；h_{c}^{i+1}为第$i+1$号齿当前侵入深度，mm；H_{c}^{i-1}为第$i-1$号齿齿高，mm；H_{c}^{i}为第i号齿齿高，mm；H_{c}^{i+1}为第$i+1$号齿齿高，mm。

绘制切削区域图时，先根据侵入深度将上一圈的投影区域沿轴向平移，得到当前圈的投影，再将其与当前圈齿轨迹的投影叠加，即可得到考虑侵入深度影响的真实切削区域。

（2）切削顺序。各齿在周向的排列顺序决定其切削区域在图像中的层级覆盖关系，若处理不当将导致像素统计失真。从井底形貌来看，可以通过当前齿与前后相邻齿的周向角差值的正负号来判断绘制顺序，从而得到考虑切削顺序的图像。

$$m=\theta_{\mathrm{c}}^{i-1}-\theta_{\mathrm{c}}^{i} \tag{23}$$

$$t=\theta_{\mathrm{c}}^{i}-\theta_{\mathrm{c}}^{i+1} \tag{24}$$

式中：m为前一齿与当前齿的周向角之差，rad；t为当前齿与后一齿的周向角之差，rad。

m与t的符号组合如表1所示。

考虑侵入深度及切削顺序后的切削面积计算流程如图6所示。

表 1　不同周向角差值组合下的绘制顺序

Table 1　Plotting sequence under different circumferential angle difference combinations

m、t正负性	绘制先后顺序(自左至右为绘制先后次序)					
	当前圈			上一圈		
$m\geqslant0$、$t\geqslant0$	i+1	i	i−1	i+1	i−1	i
$m<0$、$t\geqslant0$	i+1	i−1	i	i+1	i−1	i
$m\geqslant0$、$t<0$	i	i+1	i−1	i+1	i−1	i
$m<0$、$t<0$	i−1	i	i+1	i−1	i+1	i

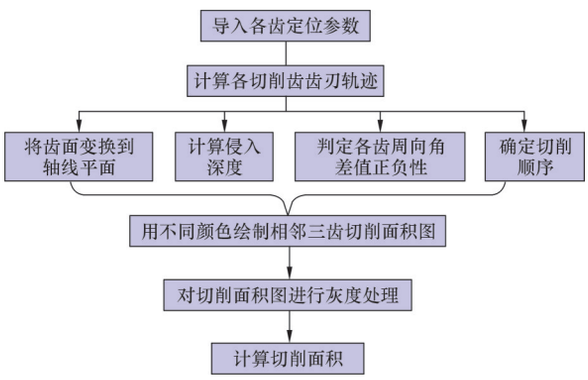


图 6　切削面积计算流程图

Fig. 6　Process of cutting-area calculation

3　着色法与数值积分法切削面积结果对比

为验证着色法的有效性与精度，以一款典型的PDC钻头为算例，用数值积分法进行对比。钻头直径为215.9 mm，主切削齿数为19，设定钻速为7.2 m/h，转速为96 r/min，复合片直径为19 mm，对应布齿参数如表2所示。

图7为着色法与传统数值积分法计算所得的各齿切削面积结果对比。由图7可知，2种方法的计算结果在各齿切削面积分布规律上具有较高一致性，整体相对误差控制在5%以内，表明着色法能够较为准确地反映实际切削过程中齿刃与岩石间的接触面积，具备较高的计算精度与可靠性。与传统的数值积分方法相比，着色法通过对齿刃轨迹区域进行像素化处理，并利用色彩编码实现不同切削区域的可视化分辨，使得切削面积的识别与计算更加直观。对于18、19号边缘齿，由于其在切削过程中的参与度较低，实际接触岩石的有效面积极小，数值积分法在该区域计算中易受到离散化误差和边界效应影响，导致结果趋近于0。而着色法能够基于图像像素分布准确识别边缘齿微小的有效切削区域，从而在小尺度和复杂边界条件下保持较高的分辨率。这说明笔者所提出的方法在处理复杂几何边界及局部切削特征时的优势明显，可为后续切削力预测和布齿参数优化提供基础数据支撑。

表 2　布齿参数

Table 2　Cutter arrangement parameters

齿号	定位半径/mm	定位高度/mm	周向角/(°)	前倾角/(°)	侧倾角/(°)	装配角/(°)	复合片直径/mm	复合片厚度/mm
1	9.47	33.28	355.54	30	0	−17.00	19	16
2	21.85	37.06	174.35	30	0	−17.00	19	16
3	33.23	40.54	353.26	30	0	−17.00	19	16
4	42.10	43.26	172.41	30	0	−17.00	19	16
5	48.95	45.35	81.75	30	0	−17.00	19	16
6	55.07	47.12	351.15	30	0	−12.73	19	16
7	60.49	47.91	260.53	30	0	−4.00	19	16
8	65.37	47.92	169.88	30	0	3.77	19	16
9	71.05	47.09	79.02	30	0	12.92	19	16
10	76.52	45.36	348.08	30	0	22.06	19	16
11	81.64	42.80	257.08	30	0	31.18	19	16
12	86.30	39.44	166.05	30	0	40.33	19	16
13	90.36	35.40	75.01	30	0	49.46	19	16
14	93.50	31.12	344.07	30	0	57.91	19	16
15	96.00	26.39	253.15	30	0	66.44	19	16
16	98.00	20.59	162.18	30	0	74.24	19	16
17	99.30	15.30	71.35	30	0	78.14	19	16
18	100.10	10.88	340.70	30	0	81.36	19	16
19	100.32	6.35	250.49	30	0	82.47	19	16

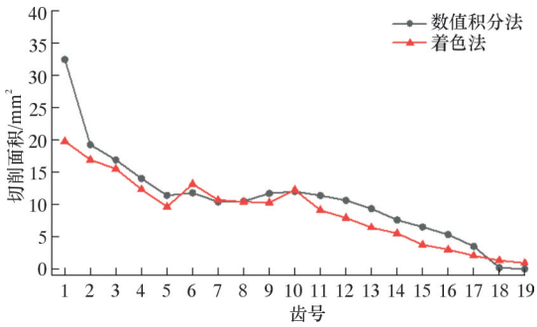


图 7　着色法与数值积分法计算结果对比

Fig. 7　Comparison of calculation results between the coloring method and the numerical integration method

着色法与数值积分法在切削面积计算中具有相同的理论目标，即通过对齿刃轨迹的量化描述，获得单位切削循环内的有效切削面积。然而，两者在后续处理上存在明显差异。

（1）数值积分法以解析几何模型为基础，将切削轨迹区域划分为微元单元，利用积分运算对各单元面积进行累加求和，进而获得总切削面积。而着色法则基于图像识别原理，将齿刃运动过程映射为二维像素分布图像，采用RGB色彩编码区分不同切削区域，再由统计像素数量与比例来计算实际面积。着色法把复杂的几何积分问题转化为图像处理问题，避免了积分离散误差的累积。

（2）数值积分法在规则几何模型和理想切削条件下精度较高，但在存在齿间干涉、非线性切削轨迹时，容易出现误差累积和边界遗漏问题。而着色法具有较强的形态识别能力，能够有效处理边缘齿、局部切削和非均匀切削深度等复杂情况，对复杂边界和微小切削区具有更高的分辨率与适应性。

4　结　论

（1）针对传统建模方法在复杂切削状态下存在建模效率低、过程烦琐、计算效率较低及切削区域表达不直观等问题，提出了一种基于着色法的PDC钻头单齿切削区域几何建模与面积计算方法。该方法通过构建二维平面切削轮廓，实现了单齿切削区域的快速构建与面积计算。

（2）建立了考虑侵入深度与切削顺序影响的单齿切削区域计算模型，模拟了切削齿运动过程中的区域变化特征，计算结果能够较好地反映PDC钻头单齿的实际切削区域分布。

（3）以直径215.9 mm、主切削齿数为19的PDC钻头为算例，将着色法与传统数值积分方法的计算结果进行了对比分析，2种方法计算结果的相对误差控制在5%以内，表明该方法在保证计算精度的同时可有效提高切削区域的建模效率。

参　考　文　献

[1] Liu Weiji, Deng Hongxing, Zhu Xiaohua, et al. The PDC cutter-rock interaction behavior in rock cutting: a review [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 229: 212168.

[2] Chen Pengju, Dai Xianwei, Shao Fangyuan, et al. Review of PDC cutter-rock interaction: methods and physics [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 228: 211995.

[3] 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 Yancao. Research status on rock-breaking mechanism and performance testing methods of PDC bit cutters [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43 (5): 553-567.

[4] Scott D, Hughes B. A bit of history: overcoming early setbacks, PDC bits now drill 90%-plus of worldwide footage [J]. Drilling Contractor, 2015, 71 (4): 60-68.

[5] 刘维，高德利. PDC钻头研究现状与发展趋势 [J]. 前瞻科技，2023，2（2）：168-178.
Liu Wei, Gao Deli. Research status and development trends of polycrystalline diamond compact bits [J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2 (2): 168-178.

[6] 未九森. PDC钻头切削结构受力分析与优化设计研究 [D]. 北京：中国石油大学（北京），2024.
Wei Jiusen. Study on cutting force analysis of PDC bit and its optimization design [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2024.

[7] 沈飞. 基于钻头与岩石相互作用的切削齿磨损机理仿真研究 [D]. 西安：西安石油大学，2024.
Shen Fei. Simulation study on cutting tooth wear mechanism based on the interaction between drill bit and rock [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024.

[8] 鲍俊锟. 四川盆地沙溪庙地层“一趟钻”长寿命PDC钻头研究与试验 [D]. 成都：西南石油大学，2023.
Bao Junkun. Research and test of long-life PDC bit for “one trip drilling” in Shaximiao formation of Sichuan Basin [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2023.

[9] 田丰，杨迎新，任海涛，等. PDC钻头切削齿工作区域及切削量的分析理论和计算方法 [J]. 钻采工艺，2009，32（2）：51-53.

Tian Feng, Yang Yingxin, Ren Haitao, et al. Analytical theory and computational method of contact area and cutting volume of PDC bit cutters [J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32 (2): 51-53.

[10] 肖仕红. PDC钻头与岩石互作用过程的计算机仿真[D]. 成都：西南石油大学，2004.
Xiao Shihong. Computer simulation of interaction process between PDC bit and rock [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2004.

[11] 任海涛，杨迎新，陈炼，等. PDC钻头钻进仿真系统数字化方法研究[J]. 西南石油大学学报（自然科学版），2010，32（5）：150-154.
Ren Haitao, Yang Yingxin, Chen Lian, et al. Research on the digital method of the PDC bit drilling progress simulation system [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010, 32 (5): 150-154.

[12] 黄何松. PDC钻头复杂运动工况动态力学特性研究[D]. 成都：西南石油大学，2019.
Huang Hesong. Study on dynamic mechanical properties of PDC bit under complex motion conditions [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.

[13] 黄安龙. PDC齿破岩过程岩石损伤演化模拟与试验研究[D]. 成都：西南石油大学，2022.
Huang Anlong. Simulation and experimental study on rock damage evolution of PDC cutter rock breaking process [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2022.

[14] Cao Tong, Chen Xuyue, Yu Kaian, et al. Experimental study of rock cutting characteristics of PDC cutter considering cutting effects of adjacent cutters [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38 (7): 3657-3666.

[15] Chen Pengju, Stefan M, Yu Mengjiao, et al. Modeling of cutting rock: from PDC cutter to PDC bit-modeling of PDC bit [J]. SPE Journal, 2021, 26 (6): 3465-3487.

[16] Ma Yachao, Huang Zhiqing, Li Qin, et al. Calculation of cutting parameters of cutters of PDC bit under wear conditions [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28 (8): 973-978.

[17] 王元吉. PDC钻头布齿参数逆向分析技术研究[D]. 成都：西南石油大学，2017.
Wang Yuanji. Research on reverse analysis technology of PDC bit tooth arrangement parameters [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.

[18] Chen Shilin, Grosz G, Anderle S, et al. The role of rock-chip removals and cutting-area shapes in polycrystalline-diamond-compact-bit design optimization [J]. SPE Drilling & Completion, 2015, 30 (4): 334-347.

[19] Zhang Chunliang, Yang Yingxin, Qi Qingliang, et al. Research on numerical drilling technology of mesh-like cutting PDC bit [J]. Energy Reports, 2021, 7: 2068-2080.

[20] Wei Jiusen, Liu Wei, Gao Deli. Modeling of PDC bit-rock interaction behaviors based on the analysis of dynamic rock-cutting process [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 239: 212955.

[21] 任钞. 煤矿PDC钻头齿破岩机理与布齿参数优化[D]. 贵阳：贵州大学，2025.
Ren Chao. Rock breaking mechanism and tooth arrangement parameter optimization of PDC bit tooth in coal mine [D]. Guiyang: Guizhou University, 2025.

[22] 王少飞. PDC钻头侧向力平衡分析及优化设计[D]. 西安：西安石油大学，2025.
Wang Shaofei. Lateral force balance analysis and optimization design of PDC bit [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2025.

[23] 李劲，尹卓，刘忠，等. PDC齿破岩力预测模型研究[J]. 石油机械，2021，49（8）：23-29，38.
Li Jin, Yin Zhuo, Liu Zhong, et al. Research on rock breaking force prediction model of PDC cutter [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49 (8): 23-29, 38.

[24] 吴泽兵，张帅，郭龙龙，等. ABAQUS二次开发在PDC单齿破岩仿真中的应用[J]. 西安石油大学学报（自然科学版），2020，35（1）：104-109.
Wu Zebing, Zhang Shuai, Guo Longlong, et al. Application of ABAQUS secondary development in rock breaking simulation of PDC cutter [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science), 2020, 35 (1): 104-109.

[25] 庞小林. 模块化布齿的新型PDC钻头破岩特性研究[D]. 成都：西南石油大学，2015.
Pang Xiaolin. Study on rock breaking characteristics of new PDC bit with modular tooth arrangement [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.

第一作者简介：邓秀丽，女，生于2000年，现为在读硕士研究生，研究方向为PDC钻头布齿优化与设计。地址：（610500）四川省成都市。email：2835499274@qq.com。

通信作者：周春晓，副教授。email：lanyanglanyang@foxmail.com。

修改回稿日期：2026-06-14

（本文编辑　刘海森）