

# 钻头干钻碎岩过程中的热传导理论分析与研究进展

管成凯<sup>1</sup>, 黄帆<sup>2</sup>, 谭松成<sup>1,3,4</sup>, 杨晖<sup>5\*</sup>, 段隆臣<sup>1,3,4</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 长江岩土工程有限公司, 湖北武汉 430010; 3. 科技部地球深部钻探与深地资源开发国际联合研究中心, 湖北武汉 430074; 4. 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北武汉 430074; 5. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海南海口 571127)

**摘要:** 钻探技术是地球深部资源开发和月球勘探的核心手段, 钻头在干钻等极端工况下的温度变化会导致钻头磨损加剧甚至失效, 解析钻头温升机制对优化钻探工艺、延长钻头使用寿命至关重要。由于实验条件难以全面模拟复杂工况, 且数值模型常因简化假设而受限, 理论模型的构建成为揭示钻头温升规律的关键。本文首先以金属切削理论为基础, 解析了切削力与切削热的生成机制, 建立了钻头-岩石-岩屑系统的三维导热微分模型。在此基础上, 从理论模型、受力分析、产热分析3个方面对比了硬质合金钻头与PDC钻头的温升机制, 指出模型通过简化切削结构分离剪切热与摩擦热的有效性。相对而言, 孕镶金刚石钻头的理论研究因金刚石颗粒的微切削特性、出刃高度动态变化及接触面积的不确定性而进展缓慢。为构建适应性更强的热力学模型, 未来需利用多物理场耦合方法, 并结合岩石特性、钻头材料属性和动态工况参数开展深入研究。

**关键词:** 钻进过程; 干钻; 热传导; 切削理论; 传热分析; 硬质合金钻头; PDC钻头; 孕镶金刚石钻头

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)06-0015-11

## Theoretical analysis and research progress of heat conduction in the dry drilling and rock breaking process of bits

GUAN Chengkai<sup>1</sup>, HUANG Fan<sup>2</sup>, TAN Songcheng<sup>1,3,4</sup>, YANG Hui<sup>5\*</sup>, DUAN Longchen<sup>1,3,4</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Changjiang Geotechnical Engineering Corporation, Wuhan Hubei 430010, China; 3. National Center for International Research on Deep Earth Drilling and Resource Development, Ministry of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China; 4. Engineering Research Center of Rock-Soil Drilling & Excavation and Protection, Ministry of Education, Wuhan Hubei 430074, China; 5. Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou Hainan 571127, China)

**Abstract:** Drilling technology is pivotal in deep earth resource development and lunar exploration. The temperature fluctuations experienced by the bit under extreme working conditions such as dry drilling can lead to increased wear and potential failure of the bit. Therefore, analyzing the temperature rise mechanism is crucial for optimizing the drilling process and extending the life of the bit. Given the limitations of experimental methods in replicating extreme operational environments and the inherent simplifications in numerical simulations, constructing a theoretical model becomes essential to reveal the temperature rise behavior of the bit. This paper first analyzes the generation

收稿日期: 2025-03-02; 修回日期: 2025-06-06 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.06.002

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“真空干钻环境下热压FeCu基自润滑孕镶金刚石钻头的钻进过程研究”(编号: 42272365); 岩土钻掘与防护教育部工程研究中心实验室开放基金项目(编号: SKJ2024081)

第一作者: 管成凯, 男, 汉族, 2000年生, 地质工程专业, 硕士研究生, 研究方向为钻探工艺与机具, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, guanck@cug.edu.cn。

通信作者: 杨晖, 男, 汉族, 1993年生, 工程师, 注册土木工程师(岩土), 地质工程专业, 硕士, 长期从事工程勘察、水工环等相关工作, 海南省海口市美兰区兴洋大道61号, 851996742@qq.com。

引用格式: 管成凯, 黄帆, 谭松成, 等. 钻头干钻碎岩过程中的热传导理论分析与研究进展[J]. 钻探工程, 2025, 52(6): 15-25.

GUAN Chengkai, HUANG Fan, TAN Songcheng, et al. Theoretical analysis and research progress of heat conduction in the dry drilling and rock breaking process of bits[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(6): 15-25.

mechanisms of cutting force and cutting heat based on metal cutting theory, establishing a three-dimensional heat transfer differential model of the bit-rock-chip system. Subsequently, the temperature rise mechanisms of cemented carbide bits and PDC bits are compared from three perspectives: theoretical modeling, force analysis, and heat generation analysis. This comparison highlights the effectiveness of the model by simplifying the cutting structure and distinguishing between cutting and frictional heat. In contrast, the theoretical study of impregnated diamond bits has progressed more slowly due to the micro-cutting characteristics of diamond particles, dynamic changes in the height of the cutting edge, and uncertainties in the contact area. To develop a more adaptable thermodynamic model, future research should employ multi-physics coupling methods, incorporating rock properties, drill bit material properties, and dynamic operating parameters.

**Key words:** drilling process; dry drilling; heat conduction; cutting theory; heat transfer analysis; tungsten-carbide bit; PDC bit; impregnated diamond bit

## 0 引言

获取资源是推动社会经济不断向前发展的物质基础,进行地球深部钻探和月球资源勘探是探索地球及深空资源、解决能源和环境问题的必由之路<sup>[1-2]</sup>,钻头的优化研究始终是钻探技术的核心<sup>[3]</sup>。

钻进过程中,钻头的温度变化主要由钻头与岩石之间的剪切热及摩擦热引起<sup>[4]</sup>。一方面,钻头高速旋转时与岩石接触产生大量热量;与此同时,循环冷却介质的导热性、流动效率,以及钻头材料的导热性等因素都会影响钻进过程中钻头表面的温度分布与变化。钻头在钻进过程中受到环境温度、围压和强摩擦等极端工况的影响,其温度变化直接影响钻进效率、钻头寿命和作业安全<sup>[5]</sup>。同时,随着深空探测技术的需求和发展,尤其是月球钻探任务的推进,钻探工作面临着真空环境、极端温差,以及无循环冷却介质等更加复杂的环境挑战,钻进过程中的温度控制尤为关键。因此,深入研究钻进过程中钻头的温度变化,可以更好地提高钻探效率和安全性,推动地球及深空资源的有效开发。

现有的实验研究和数值模拟方法在钻头温度的分析上取得了一定进展,但实验条件通常难以全面模拟真空、高温或低温等特殊环境<sup>[6]</sup>。数值模拟可在低重力和真空环境下进行多物理场耦合分析,模拟钻头-岩石接触面的热传导,但其计算成本随模型的复杂程度呈指数增长,且岩石的非均质性受限于简化假设,无法充分考虑实际钻进过程中的所有变量,导致现有研究进展仍然有较大局限性<sup>[7]</sup>。除物理实验和数值模拟方法之外,理论分析可以为数值模拟提供基本的物理模型和假设,帮助确定数值模拟的边界条件和初始条件,同时规避实验条件受限的难题。通过建立更加精确的物理模型和数

学模型,可以有效预测不同钻探工况下的温度分布,为现场操作中的温控策略提供理论依据。

在钻进原理方面<sup>[8]</sup>,钻头切削单元的破岩过程与硬质合金刀头切削金属类似。金属切削加工是工件表面材料在刀具的挤压作用下产生变形、剥离,并转化为切屑的过程。在此过程中,主剪切面的剪切变形生热和刀具切削的摩擦生热是刀具升温的2个主要热源。金属切削热的生成、传导,及其对加工环境的温度场分布等方面的研究成果可为钻头钻进升温的预测提供重要理论基础。

因此,本文将综述钻进过程中钻头温升的理论研究,并以金属切削理论为基础,探讨现有的钻头温度预测模型和分析方法。通过解析钻头温度变化的影响因素,确定钻进过程中的热量分布和深入研究钻头温度变化规律,为钻头在干钻等极端环境下的成功应用提供理论参考。

## 1 金属切削理论

### 1.1 切削力

切削力是金属加工中的关键参数。如图1所示,切削力主要来自3个方面:克服材料弹性变形的抗力、克服材料塑性变形的抗力,以及克服切屑与刀具前、后刀面和已加工表面间的摩擦力 $F_f^{[9]}$ 。在实际加工中,这3个分力可合成1个合力 $F$ 。

若忽略副切削刃的影响和其他改变切屑流向的因素,可将 $F$ 分解为3个互相垂直的分力(见图2)。主切削力 $F_c$ 垂直于水平基准面并与切削速度( $v$ )方向一致;径向力 $F_r$ 在水平基准面内,垂直于进给方向;轴向力 $F_f$ 也在水平基准面内,与进给方向平行,也称进给力。随着刀具几何参数、刃磨质量、磨损程度及切削量的变化, $F_c$ 、 $F_r$ 也相应改变<sup>[10]</sup>。

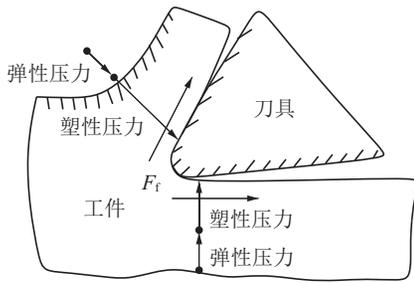


图1 切削力的来源<sup>[10]</sup>

Fig.1 Sources of cutting force

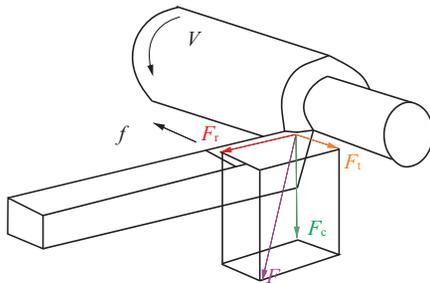


图2 切削力的合力及分力<sup>[10]</sup>

Fig.2 The resultant and component forces of cutting

### 1.2 切削热的产生与传递

切削过程中,绝大部分能量转化为切削热,影响刀具寿命、刀具涂层与基体结合强度,以及刀-屑接触摩擦系数等。切削过程有三个主要热源区域:剪切区、刀具-切屑接触区、刀具-工件接触区。如图3所示,对应不同变形区的热流密度分别为 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ ,其中各变形区产生的热量分别传递到切屑和工件的比例由 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 决定。

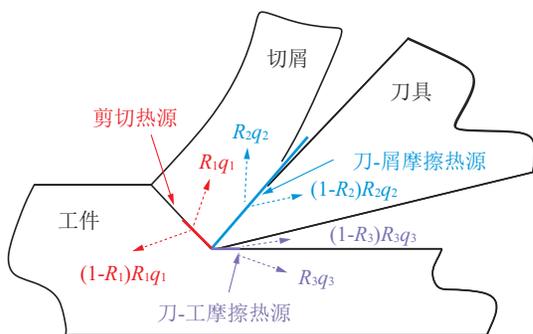


图3 切削热流密度分配图<sup>[11]</sup>

Fig.3 Cutting heat flow density distribution.

金属切削过程中的产热与热量传导关系如图4所示,金属切削过程中总能量 $W$ 的消耗主要体现在新生表面能 $W_n$ 、剪切变形能 $W_s$ 、摩擦能 $W_f$ 和切屑过剪切面时动量变化引起的能量 $W_m$ <sup>[12]</sup>。

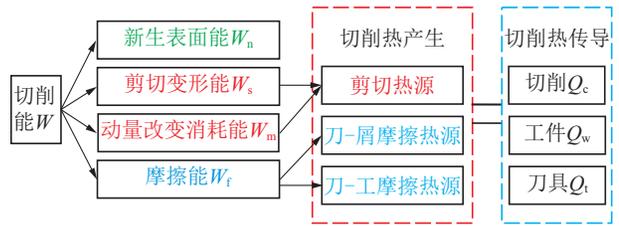


图4 切削中热量产生及热量传导<sup>[12]</sup>

Fig.4 Heat generation and heat transfer in cutting

### 1.3 热力学理论

钻头钻进岩石过程中的热力学理论因其复杂性和多变性导致研究难度较大,当前切削热的理论研究主要集中在金属切削领域<sup>[13]</sup>。

金属切削过程中,切削热的产生与传递一直是机械加工领域的关键问题之一。1907年,Taylor<sup>[14]</sup>认识到热在刀具磨损过程中的重要作用,首次关注切削过程中的温度变化,并提出了切削速度与刀具寿命之间的经验关系,这一理论至今仍广泛应用。1942年,Jaeger<sup>[15]</sup>着手切削温度的研究,提出了通过热源法计算切削温度的模型(式1),其核心是把刀具切削过程中产生的热量当成在半无限平面上连续移动分布的热源,并假设热源的移动速度、宽度及热强度分布不变。该模型为进一步理解切削过程中热量的分布和传递机制提供了新的理论。

$$T_c = 0.745(1 - \lambda_c) Q_c \left( \frac{l_c}{\lambda_c \rho_3 c_3 V_3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

1951年,Trigger等<sup>[16]</sup>运用Blok的热分配原理,将切屑和刀具之间的摩擦热源视为相对切屑移动的热源,成功计算了切屑和刀具的平均热分配比例,并基于此推导出了刀具和切屑界面处的平均温度。1954年,Loewen等<sup>[17]</sup>应用Blok的热分配原理,对Jaeger的模型进行了进一步修正。

切削热分配比例在切削理论中具有重要意义,它决定了切削过程中产生的热量如何在刀具、切屑和工件之间分配。合理的热分配有助于优化切削参数,并减少刀具的磨损和热疲劳,从而延长刀具使用寿命。Hahn<sup>[18]</sup>假设剪切面处于无限体中计算了剪切面热量分布模型;Loewen等<sup>[17]</sup>提出刀具在半无限体表面移动模型,计算了剪切热分配系数 $R_s$ ;Weiner<sup>[19]</sup>假设切屑是沿着垂直于剪切面的方向运动,并忽略沿切屑产生方向的热传导建立了Weiner模型。综上,金属切削生热过程中,沿着剪切面流入切屑和工件的分配系数 $R_s$ 可通过解析方

法计算,不同研究者提出的解析模型见表1。

表1 不同模型剪切热分配系数  $R_s$   
Table 1 Cutting heat distribution coefficients  $R_s$   
for different models

模 型	剪切热分配系数 $R_s$
Hahn	$R_s = 1 - \frac{2 \sin^2 \phi}{\pi R} \int_0^{\frac{R}{\sin \phi}} \int_0^{\rho} (e^{-u \cos \phi} + e^{u \cos \phi}) K(u) du d\rho$
Loewen and Shaw	$R_s = \frac{1}{1 + 0.754 \sqrt{R \tan \phi}}$
Weiner	$R_s = \frac{1}{4z} \operatorname{erf} \sqrt{z} + (1+z) \operatorname{erfc} \sqrt{z} - \frac{e^{-z}}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{1}{2\sqrt{z}} + \sqrt{z} \right)$

## 2 钻进过程中的传热分析

### 2.1 钻进过程中的热传导分析

在探讨钻头钻进过程中的热特性时,热力学定律和傅里叶定律为导热微分方程提供了理论依据。建立如图5所示的导热微元模型,可以得到基本的导热微分方程。

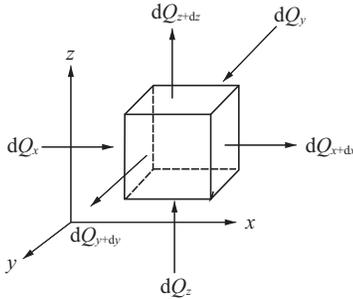


图5 传热微元模型

Fig.5 Heat transfer micromodel

根据已知文献,首先假设该微元模型内的物体为各向同性的连续介质;其次,如果研究对象存在内热源,其内热源强度为  $Q$ 。则由图5可知:

$$Q_{\text{流入}} - Q_{\text{流出}} + Q = \Delta U \quad (2)$$

式中:  $Q_{\text{流入}}$ ——流入微元的热量;  $Q_{\text{流出}}$ ——流出微元的热量;  $\Delta U$ ——微元内的热能增量。

$$Q_{\text{流入}} = dQ_x + dQ_y + dQ_z \quad (3)$$

$$Q_{\text{流出}} = dQ_{x+dx} + dQ_{y+dy} + dQ_{z+dz} \quad (4)$$

由傅里叶定律和能量守恒定律可得:

$$dQ_x = q_x dydz = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dydz \quad (5)$$

将流量密度  $q$  用泰勒公式展开可得:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (6)$$

$$dQ_{x+dx} = dQ_x - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx dy dz \quad (7)$$

$y$  方向和  $z$  方向与  $x$  方向同理,即微元体内的热量增量为:

$$d\Delta U = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (8)$$

根据上述方程,可得热量的表达式为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

式中:  $T$ ——初始温度;  $x, y, z$ ——系统内的某点坐标;  $\rho$ ——材料密度;  $c$ ——比热容;  $\lambda$ ——导热系数。

### 2.2 导热微分方程

假设岩石、钻头、岩屑三者是封闭系统,只在剪切破坏区域产生剪切热,结合金属切削加工原理,可得到钻头钻进过程中的热量传递微分方程组。

对于岩石来说:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z_1^2} \right) \quad (10)$$

对于钻头来说:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y_2^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z_2^2} \right) - \rho_2 c_2 (v_{2x} \frac{\partial T_2}{\partial x_2} + v_{2y} \frac{\partial T_2}{\partial y_2} + v_{2z} \frac{\partial T_2}{\partial z_2}) \quad (11)$$

对于岩屑来说,其方程如下:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial x_3^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y_3^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z_3^2} \right) - \rho_3 c_3 (v_{3x} \frac{\partial T_3}{\partial x_3} + v_{3y} \frac{\partial T_3}{\partial y_3} + v_{3z} \frac{\partial T_3}{\partial z_3}) + Q \quad (12)$$

式中:  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ ——钻头、岩石、岩屑的密度;  $v_{2x}, v_{2y}, v_{2z}$ ——相对应的点的速度分量。

理论上,利用上述微分方程可以求解特定条件下的岩石、钻头和岩屑的实时温度,但由于该微分方程所涉及的变量过多,计算复杂,实际应用价值有限。因此,目前对于钻头钻进岩石的温升理论均采用解析算法来探索钻头温度变化的规律。

## 3 热传递理论在钻进过程中的应用

常用的取心钻头包括硬质合金钻头、PDC 钻头、金刚石钻头,在实际应用中根据不同的地层

条件及取样需求选择不同类型和性能的钻头。但总体而言,钻头破碎岩石的过程基本一致,即在给进压力的作用下挤压岩石,同时在扭矩的作用下回转切削岩石,如图6所示。

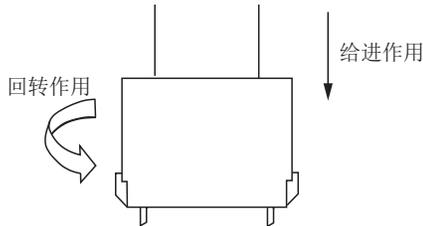


图6 钻头钻进过程

Fig.6 Drilling process of the drill bit

在钻进过程中产生的总热量来源于回转和切削共同作用下剪切岩石产生的剪切热以及摩擦面产生的摩擦热<sup>[4]</sup>。剪切面热量部分传入岩石使其软化加速切削,部分进入岩屑;摩擦面热量部分传入钻头弱化其钻进性能,部分继续使岩屑升温。根据Blok的热分配原理,最终钻头的温度与岩屑温度相同,即两种共同作用的结果。

对钻进过程的理论分析首先需要建立合适的切削模型,包括钻头的几何形状、切削角度等。通过对切削模型进行受力分析,得到钻头和岩石所受到的剪切力和摩擦力,这2个力将直接影响钻头的温度。结合对钻头的钻进过程以及钻头和岩石的受力分析,将产热来源分为剪切过程中产生的剪切热和摩擦产生的摩擦热,这些热量使钻头、岩石和岩屑三者的温度共同升高。

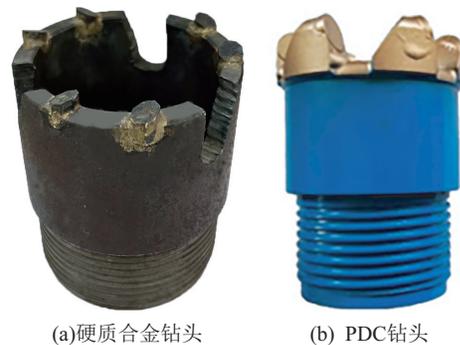
由于PDC钻头和硬质合金钻头的切削单元结构相对简单,现有文献中关于这2种钻头的温升理论研究相对较多,主要集中在干钻钻进过程中由剪切热和摩擦热引起的钻头温升变化。孕镶金刚石钻头通过大量细小金刚石颗粒对岩石进行微切削,而单颗粒金刚石的切削破岩过程与金刚石颗粒形状、出刃高度,以及金刚石与岩石、岩屑的接触面积等因素密切相关,现有相关的理论研究相对较少。基于此,本文将钻头钻进破岩过程中的热传递研究分为两部分,一部分着重探讨PDC钻头和硬质合金钻头的钻进升温机制,从切削模型,切削力的来源及分析,切削产热和摩擦产热归纳现有研究,另一部分则聚焦于孕镶金刚石钻头的温升特性及其理论研究的不足。

### 3.1 硬质合金钻头和PDC钻头中的热传递理论

#### 3.1.1 切削岩石理论模型建立

理论模型在分析钻进过程中的热传递至关重要,能够帮助量化钻头在工作过程中的热行为,为钻进效率和钻头寿命的优化提供理论依据。准确的理论模型可模拟钻头与岩石的相互作用、热传递机制和应力分布,进而优化钻进参数、提高钻探效率、减少设备磨损和延长钻头寿命。

常见的硬质合金钻头和PDC钻头如图7所示,这2种钻头切削齿的几何形状较为规则且无复杂的结构特征,理论模型的构建也相对简单。简化切削单元结构更便于分析钻头与岩石之间的切削和摩擦行为,使得对钻头热量生成、磨损和热传递效率等方面的理论研究模型更加直观和易于实现<sup>[20]</sup>。



(a)硬质合金钻头

(b) PDC钻头

图7 钻头实物

Fig.7 Drill bits

李晓红等<sup>[21]</sup>通过分析硬质合金钻头钻进过程中的热量转化、传递,建立了硬质合金钻头干切削岩石条件下的前刀面温度方程。该方程将前刀面的平均温度近似等价于剪切面的平均温度与刀屑接触面摩擦温升之和,建立的切削模型如图8所示,将硬质合金切削齿简化为三角形,并以一定角度剪切岩石。杨晓峰等<sup>[22]</sup>在前述基础上对硬质合金钻头钻进过程中产生的热量进行了分析,对于每个刀齿,其前端面在推力作用下压入岩石一定深度,而侧端面在扭矩作用下发生旋转和切削周围岩石,建立的切削模型如图9所示。该模型将切削齿简化为竖立的三角形,只考虑切削齿前刀面与岩屑之间的摩擦,而忽略了切削齿底部与岩石的摩擦。

Gao等<sup>[23]</sup>和Zhang等<sup>[24]</sup>都对PDC钻头钻取岩心时的温度场进行了建模和理论分析。Zhang等建立的切削模型如图10所示,相较于硬质合金钻头,

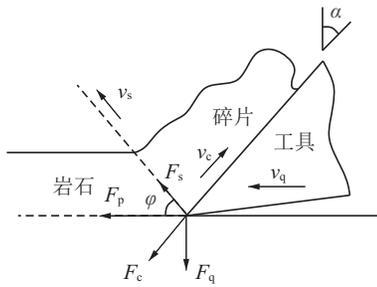


图8 李晓红切削模型<sup>[21]</sup>

Fig.8 Li Xiaohong cutting model

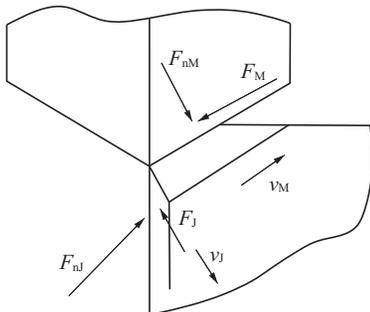


图9 杨晓峰切削模型<sup>[22]</sup>

Fig.9 Yang Xiaofeng cutting model

PDC钻头的切削齿形状更为单一,切削模型更为固定,以一定的角度剪切破碎岩石。该模型考虑了切削齿切削岩石的主切削力和前刀面摩擦力,与李晓红和杨晓峰提出的切削模型不同,本模型考虑了切削齿底部与岩石之间的摩擦。

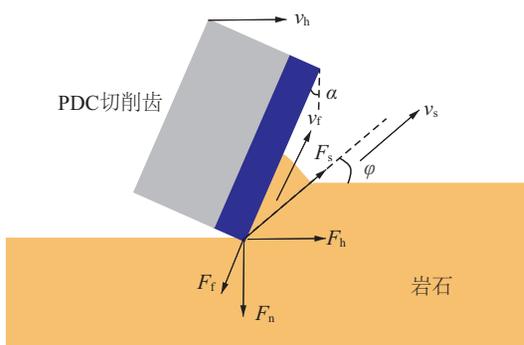


图10 Zhang等建立的切削模型<sup>[24]</sup>

Fig.10 Cutting model by Zhang, et al

王海根<sup>[25]</sup>和何录忠<sup>[26]</sup>进一步建立了模拟月岩条件下钻进过程中的热传递机理及月表取心钻头的旋转切削热分析模型。在月球高真空复杂环境下,钻头钻进产生的热量无法有效释放,只能在钻头、岩石与岩屑三者之间进行相互传递,因此在热

传导分析时将三者作为一个系统进行分析。王海根建立的扭矩和轴向给进力共同作用下的钻头切削模型如图11所示,并变换了不同阶段切削齿切入岩石的角度,以达到更加合理的切削效果。何录忠建立的月表岩石切削模型及其切削机理如图12所示,该模型可概括为小岩屑与大岩屑交替切削所形成的循环过程。

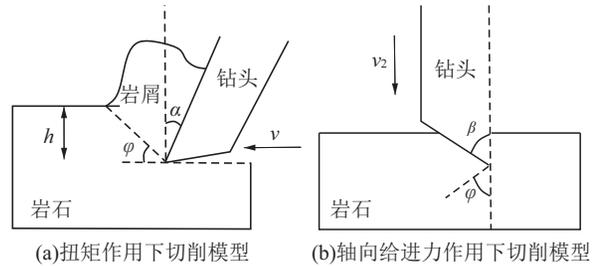


图11 王海根模型<sup>[25]</sup>

Fig.11 Wang Haigen cutting model

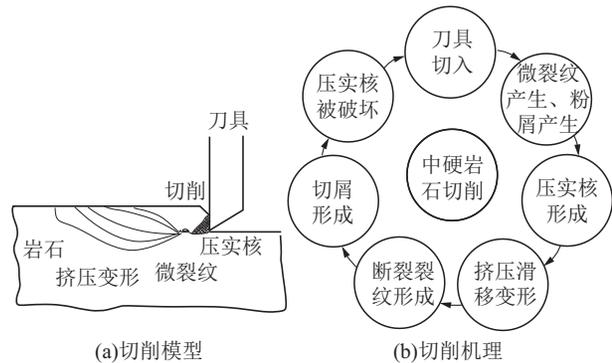


图12 何录忠切削模型及机理<sup>[26]</sup>

Fig.12 He Luzhong cutting model and mechanism

刘春朋<sup>[27]</sup>和董硕<sup>[28]</sup>针对极地深层冰芯钻探研究了冰层回转钻进切削的温度场变化。深层冰芯钻探工作采用了铠装电缆式电动机械取心钻进技术,所用取心钻头及其切削模型如图13所示。为了控制钻头的切削深度,避免因切深过大导致切削具崩坏和造成孔内事故,在切削具下方设计有垫块,从而增加了垫块与下方冰层之间的摩擦生热区。

总体而言,不同领域的切削模型均以钻头破碎岩石过程为基础,结合金属切削理论将剪切热和摩擦热作为热量来源,为钻头钻进温度的分析提供了简化的理论框架,并使其可以适用于快速评估钻头的钻进温升状态。不足之处在于,这些模型往往忽略了岩石的非均质性和裂隙特性,难以准确反映岩石内部复杂的应力分布与热流变化。同时,现有模

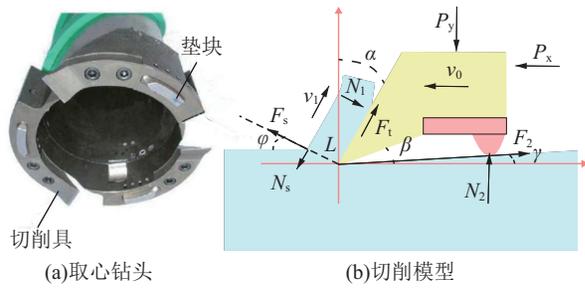
图 13 钻头及切削冰层示意<sup>[28]</sup>

Fig.13 Drill and ice cutting

型对切削力的假设也通常基于均质材料,导致模型在应对岩石的非连续性结构、孔隙度等多因素影响时显得不够全面,理论模型计算结果与实际钻进情况存在偏差。

### 3.1.2 理论模型中力的分析及计算

在计算钻头钻进升温的模型中,钻头在钻进过程中的受力分析及切削力的确定至关重要。切削力直接影响钻头与岩石之间的热量生成及能量转化,因此准确描述和分析切削力是建立合理的钻头升温模型的关键。现有的切削力计算方法主要有 2 种:一是直接沿用金属切削理论中的切削力公式,相对较为简便;另一种则是基于岩石破坏准则,通过分析岩石在钻进过程中的破坏模式,反推出相应的切削力。这一方法考虑了岩石的特性,如硬度、脆性和结构不均匀性等。

王海根<sup>[25]</sup>和 Gao 等<sup>[23]</sup>参考金属切削加工,得到钻头切削岩石过程中的主切削力和背向力计算公式如下:

$$F_c = 9.81 C_{Fc} a_p^{x_{Fc}} f^{y_{Fc}} V^{z_{Fc}} k_{Fc} \quad (13)$$

$$F_p = 9.81 C_{Fp} a_p^{x_{Fp}} f^{y_{Fp}} V^{z_{Fp}} k_{Fp} \quad (14)$$

相关系数能够通过《金属加工手册》查询获得。

何录忠<sup>[26]</sup>、董硕<sup>[28]</sup>都在建立模型时默认岩石发生剪切破坏,并根据受力分析建立其水平方向和竖直方向的力学平衡方程,再根据摩尔-库仑准则推算出相应的剪切力和摩擦力。何录忠建立的钻头切削受力分析如图 14 所示。

钻头旋转钻进破岩过程中,钻头切削齿在钻压作用下向下挤压岩石,当切削齿与岩石垂直接触面上的进给力等于或大于岩石的抗压强度时,切削齿压入岩石,再通过水平切削力的作用发生剪切破岩,实现钻头对岩石的切削。

刘春朋<sup>[27]</sup>以单个切削齿为研究对象,把切削具

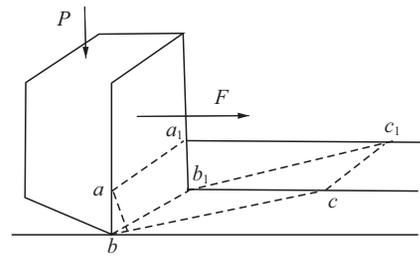
图 14 钻头切削受力分析<sup>[26]</sup>

Fig.14 Force analysis of bit cutting

和垫块看作一个整体进行受力分析,并将钻头回转切削冰层的过程简化为单一剪切平面模型。通过对切削具和垫块整体进行受力分析,得到单个切削齿的水平垂直方向的平衡方程,并根据摩尔-库仑准则,得到冰层的破坏条件,从而计算出剪切面上的剪应力和正应力。

对比而言,直接沿用金属切削理论中计算切削力的方法过程简便,且金属切削理论中已有成熟的切削力计算模型和公式,因此能够简化计算过程,避免重新推导复杂的方程。而岩石与金属在物理性质等方面差异较大,不能准确反映工况环境发生变化时的岩石破碎行为。

极限平衡法基于静力分析原理,较为真实地反映了岩石在钻进过程中受到的力学作用。该方法利用岩石的抗压强度、抗剪强度等参数,通过极限平衡条件计算切削力,从而为钻进过程提供更符合实际的切削力计算结果。由于该方法能更好地适应岩石材料的特性,相较于沿用金属切削力的计算方法更加适用于岩石切削。然而,岩石的破坏过程是一个复杂、循序渐进的过程,而极限破坏平衡条件通常假设岩石在瞬间发生破坏,且不同类型的岩石需要不同的破坏准则,导致该方法存在一定计算复杂度和不确定性。

### 3.1.3 剪切过程中热的生成与传递

在计算剪切热时,通常将剪切力与被剪切材料的位移作为生热量计算模型的关键参数。剪切热的产生是基于剪切力作用在岩石或金属材料的切削层上,使材料发生塑性或弹性变形,从而通过力与位移的乘积来计算做功,即生成的热量<sup>[29]</sup>。

以王海根的剪切模型为例,剪切过程中的岩石受力分析和速度关系如图 15 所示。

在剪切面上,切削齿单位面积时间内剪切岩石产生的热量为 \$Q\$,则:

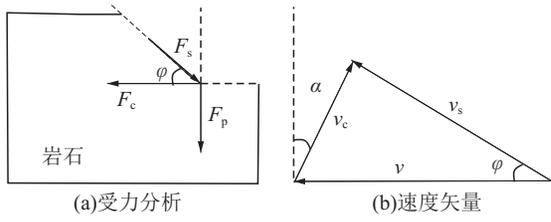
图 15 岩石受力分析与速度关系<sup>[25]</sup>

Fig.15 Rock force analysis and velocity relation

$$Q_s = \frac{F_s v_s}{bh} \sin \phi \quad (15)$$

剪切速度  $v_s$ :

$$v_s = \frac{v \cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (16)$$

设热量流入岩石的分配系数为  $R_s$ , 由热量公式  $Q = cm\Delta T$  及温度准则可以得到, 剪切面上的岩屑与岩石的温度相等:

$$T_s = \frac{(1 - R_s)Q_s}{\rho_x c_x bhv} \quad (17)$$

式中:  $\rho_x$ ——剪切下来的岩屑的密度;  $c_x$ ——比热;  $b$ ——切削宽度;  $h$ ——切削厚度;  $v$ ——切削速度。

剪切面的热分配系数  $R_s$  如表 1 所示, 不同模型采用的分配系数模型不同, 但基本原理方法一致, 最终结果只与不同理论模型中的切削角度, 以及切削齿与岩石的接触面积有关。

在钻进过程中, 剪切热是能量转化与材料变形的核心产物。剪切热主要来源于材料剪切变形时的塑性功耗散, 当钻头作用于岩石时, 岩石在剪切面上发生剧烈塑性形变, 原子间键能的破坏和重新排列导致能量以热的形式释放, 切削齿与岩石接触区的局部温度大幅升高, 而在月球等真空环境中, 剪切热积累更加显著。计算剪切热的本质是基于能量守恒定律, 即外力对材料做功转化为热能, 前述切削模型计算剪切生热时均采用了这一方法。

### 3.1.4 摩擦过程中热的生成与传递

在计算摩擦热的过程中, 根据切削齿底面是否与岩石接触, 可将不同理论模型分为 2 种类型, 一种是只考虑前刀面与岩屑的摩擦, 另一种是同时考虑前刀面和底刀面的摩擦<sup>[30]</sup>。只考虑一种摩擦时, 如王海根模型中钻头刀具的受力如图 16 所示。

在单位时间内, 通过岩屑与钻头上刀面之间的摩擦产生的摩擦热  $Q_c$  为:

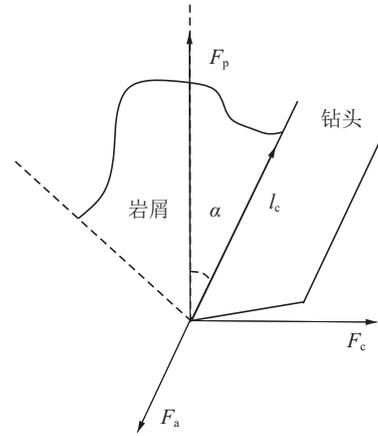
图 16 刀具受力分析<sup>[25]</sup>

Fig.16 Tool force analysis

$$Q_c = \frac{F_a v_c}{bl_c} \quad (18)$$

式中:  $F_a$ ——前刀面与岩屑的摩擦力;  $v_c$ ——摩擦速度;  $l_c$ ——前刀面与岩屑接触长度。

热量流入钻头的分配系数为  $\lambda_c$ , 流入岩屑的热量为  $(1 - \lambda_c)Q_c$ 。根据 Jaeger 对平面摩擦的分析(式 1), 可以把岩屑和前刀面的摩擦情况作为移动热源和平面之间的摩擦来考虑。在摩擦面上, 新产生的摩擦热让在剪切时已经获得一定温升的岩屑温度又升高了  $T_c$ ; 因此, 前刀面的温升为  $T_1$ , 岩屑温升为  $T_s + T_c$ 。由岩屑和钻头的温度相等, 可求出摩擦热流入钻头的分配系数  $\lambda_c$ , 从而得到钻头前刀面的温升。上述方法不用再考虑摩擦过程中如何计算出热量流入岩屑的比例  $\lambda_c$ , 而是直接通过温度等式反解出  $\lambda_c$ 。

在考虑切削齿同时受到底面和侧面的摩擦力时, 其切削模型如张增增的 PDC 切削模型所示, 切削齿底面摩擦力  $f_1$  和侧面摩擦力  $f_2$  的计算公式:

$$f_1 = \mu_1 F \quad (19)$$

$$f_2 = \mu_2 P = \frac{\mu_2 M}{2\pi \bar{R}} \quad (20)$$

式中:  $\mu_1$ ——钻头底面与岩石的摩擦系数;  $F$ ——钻头对岩石的压力, 即钻压;  $\mu_2$ ——钻头侧面与岩石的摩擦系数;  $P$ ——钻头侧面受到的压力;  $M$ ——钻头的扭矩;  $\bar{R}$ ——钻头侧面的当量摩擦半径。

该模型使用的钻进压力, 以及钻头底面与岩石的摩擦系数, 可看作是前刀面摩擦, 和岩屑摩擦是相互独立的两个系统。摩擦热主要来源于钻头与岩石表面的相对滑动, 在干钻过程中, 摩擦热的局

部集中导致钻头材料的热疲劳、氧化和相变,堆积在孔底的岩屑因无法排出加剧钻头的磨损。在计算摩擦热时,钻进压力和切削齿与岩石的摩擦系数将直接影响摩擦热的大小。

### 3.1.5 小结

硬质合金钻头与PDC钻头的温升理论研究已形成较为系统的框架。现有模型通过简化切削齿结构,聚焦剪切热与摩擦热的量化分析,揭示了温升的核心机制:主切削力与摩擦力的能量转化是热源生成的关键,而热量分配(如Blok原理与Jaeger移动热源模型)直接影响钻头表面温度分布。基于上述理论计算结果表明,影响温度的主要因素有钻头、岩石的形状和尺寸、热学和物理学性质,以及钻进参数等。在岩石和钻头材料确定以后,钻头温度升高与转速、轴向压力以及给进速度有关系。

## 3.2 孕镶金刚石钻头的热特性研究

孕镶金刚石钻头是一种固定切削齿钻头,主要依靠切削齿中包含的大量颗粒状金刚石对岩石的微切削作用破碎井底岩石,其突出特点是孕镶齿具有优良的耐磨性、抗冲击性和自锐性<sup>[31]</sup>。

目前,对于孕镶金刚石钻头钻进升温的大部分研究均以实验和模拟为主要手段,沈立娜等<sup>[32]</sup>研究了金刚石取心钻头的干钻实验,探讨了钻进参数及钻头种类对钻进过程热特性的影响,结果表明孕镶钻头的温升速率为PDC钻头的2倍,转速对金刚石钻头温升的影响较大。而常思等<sup>[33]</sup>合理利用切削产生的热能弱化岩石强度,提高了钻头的钻速。王悦等<sup>[34]</sup>建立了孕镶金刚石钻头钻进岩石的几何模型,并模拟出单颗金刚石与岩石相互作用时切削力的变化情况,为理论研究提供了基础模型。

在实践中,可通过调节钻进规程参数来控制钻头温升,但哪个参数对钻头温升的影响更大,仍然没有一致的结论。目前存在3种不同的观点<sup>[35]</sup>:(1)钻压与转速对温升的影响是等效的。(2)钻压与转速对温升的影响并非等效,钻压对温升的影响相对较大。在不超临界规程的前提下采用较高的转速钻进,较之采用较大钻压更为合理,此时不仅有利于提高机械钻速,而且钻头温升较小,有助于提高钻头寿命。当达到临界规程时,无论是钻压还是转速的增加,都将导致钻头温度急剧升高。(3)转速对温升的影响大于钻压对温升的影响,且比其他因子(泵量、泵压和水口数等)高2~5倍,在金刚石钻

进中过分地追求高转速将使钻头温升大幅度提高。

孕镶金刚石钻头相较于PDC钻头和硬质合金钻头具有更复杂的切削破岩过程,主要体现在以下几个方面:首先,孕镶金刚石切削齿的切削单元包括金刚石粒度、浓度、胎体材料耐磨性等多个评价指标;其次,单个孕镶齿可能具有平底、圆弧、同心圆尖齿等不同形式,导致切削齿不同位置与岩石的接触状态存在差异;第三,金刚石孕镶齿具有自磨出刃的特性,胎体材料的耐磨性和胎体对金刚石颗粒的把持力等均会影响孕镶金刚石钻头底唇面上金刚石颗粒的最大出刃高度和出刃率,也即影响孕镶金刚石切削齿工作面上的金刚石微元数量和平均出刃高度,进而影响金刚石切削破岩理论模型。

杨光录<sup>[36]</sup>在一定假设条件下推导了钻头唇面上金刚石的最大出刃量,以及吃入岩石最大深度等重要参数的计算方法,为理论计算提供了一定基础。赵建康等<sup>[37]</sup>从摩擦学角度出发,以能量转化和守恒定律为基础,简单确立了钻头温度与钻压、转速的关系,建立了孕镶金刚石钻头钻进升温的数学物理模型,但由于未考虑金刚石的粒度、胎体耐磨性等因素,实验结果与真实情况存在较大偏差。

目前对孕镶金刚石钻头温升的理论研究还停留在宏观整体上切削岩石或单颗金刚石的切削研究,孕镶金刚石钻头在钻进过程中由于出刃高度发生动态变化,导致其与岩石、岩屑的接触面积等无法确定为具体的数值,从而无法建立一个确切的孕镶金刚石钻头切削破岩理论模型。因此,对孕镶金刚石钻头的高效、低磨损钻进理论研究,需要建立金刚石出刃高度的动态演化模型,引入统计学方法量化微元数量和接触面积的随机性,通过精细化实验加多尺度仿真,验证理论假设,形成“理论-实验与模拟-理论”的研究体系。

## 4 总结与展望

目前已有不少关于硬质合金钻头和PDC钻头温升的理论研究,这些研究均采用金属切削理论或岩石破坏准则分析摩擦热、切削热的产生机理及热源。这些理论研究大部分基于单一结构的切削齿,通过建立剪切热和摩擦热的理论计算模型获得较好的力-热耦合模拟结果。研究成果可为钻头性能优化提供一定参考依据,但是在复杂钻进工况下,如高温、高压等条件下,钻头刀具的热传导和热

耦合作用还需要进一步深化研究。为了提高模型的预见性和适用范围,在今后的工作中,通过结合具体的钻进工作面发展更为通用的热-力耦合模型,并考虑岩石特性、钻头材料属性、动态摩擦等因素,将模型进一步完善,使用多物理场耦合方式模拟复杂钻进条件下的钻头温升行为。

对于孕镶金刚石钻头的温升理论研究则相对较少,主要原因是孕镶金刚石钻头切削单元是单颗金刚石颗粒,粒度小,切削齿在工作面上分布不均,出刃高度不同,对热源分析和温度场计算都存在一定的难度。目前较多对钻头局部温升开展定性研究,整体温度场的建模以及对钻头的动态热力学行为量化还处于初级阶段。因此,有必要深入分析孕镶齿和岩石接触过程的局部热源产生和传递机理,建立精准的动态温度场模型,找出热源分布的变化规律,研究复杂工况下钻头的热-力耦合作用,进而得知钻头温升对钻进速度、摩擦特性及钻头材料性能的影响,为提高孕镶金刚石钻头在高效钻探中的应用提供理论依据和技术支撑。

### 参考文献(References):

- [1] Neal C R, Salmeri A, Abbud-Madrid A, et al. The moon needs an international lunar resource prospecting campaign [J]. *Acta Astronautica*, 2024, 214:737-747.
- [2] Lü Q T, Yan J Y, Chen X H, et al. Progress of deep geological survey project under the China geological survey [J]. *China Geology*, 2020, 3(1):153-172.
- [3] Yuan Z H, Zhao H F, Li X H, et al. Design and modeling of a dual-archimedes screw deep drilling system for lunar subsurface exploration [J]. *Acta Astronautica*, 2024, 217:221-237.
- [4] 钱磊, 王晓川, 康勇, 等. 岩石取芯切削钻进过程温度分析与试验研究 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(5):1402-1409.  
QIAN Lei, WANG Xiaochuan, KANG Yong, et al. Temperature analysis and experimental study of core drill cutting and drilling process [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(5):1402-1409.
- [5] Mostofi M, Richard T, Franca L, et al. Wear response of impregnated diamond bits [J]. *Wear*, 2018, 410/411:34-42.
- [6] 李忠华, 于文鑫, 徐连满, 等. 钻进速度对钻屑温度影响的实验研究 [J]. *实验力学*, 2012, 27(4):498-502.  
LI Zhonghua, YU Wenxin, XU Lianman, et al. Experimental study of the effect of drilling speed on drill cuttings temperature [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2012, 27(4):498-502.
- [7] 金彤, 徐振洋, 王雪松, 等. 旋转钻进过程中的破岩能耗特征分析 [J]. *矿业研究与开发*, 2024, 44(4):228-236.  
JIN Tong, XU Zhenyang, WANG Xuesong, et al. Energy consumption characteristics of rock breaking during rotary drilling process [J]. *Mining Research and Development*, 2024, 44(4):228-236.
- [8] Li Y X, Zhang K, Wang Y, et al. Analysis of drilling response under ultra-high-speed diamond drilling: theory and experiment [J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 243:213239.
- [9] 杜宇波. 回转振动钻削切削力分析 [J]. *机械研究与应用*, 2009, 22(6):21-23.  
DU Yubo. Analysis of cutting force in peripheral spindle vibration drilling [J]. *Mechanical Research & Application*, 2009, 22(6):21-23.
- [10] 武文革. 金属切削原理及刀具(第2版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.  
WU Wenge. *Principles of Metal Cutting and Cutting Tools (2nd Edition)* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [11] 王立国. 涂层刀具切削热传导及切削性能研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2018.  
WANG Ligu. Study on cutting heat conduction and cutting performance of coated tools [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2018.
- [12] Komanduri R, Hou Z B. A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology [J]. *Tribology International*, 2001, 34(10):653-682.
- [13] Komanduri R, Hou Z B. Thermal modeling of the metal cutting process — part III: temperature rise distribution due to the combined effects of shear plane heat source and the tool-chip interface frictional heat source [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001, 43(1):89-107.
- [14] Taylor F W. On the art of cutting metals [J]. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 1906, 28:31-279.
- [15] Jaeger J C. Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts [J]. *Journal and proceedings of the Royal Society of New South Wales*, 1942, 76(3):203-224.
- [16] Trigger K J, Chao B T. An analytical evaluation of metal-cutting temperature [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1951, 73(1):57-66.
- [17] Loewen E G, Shaw M C. On the analysis of cutting-tool temperatures [J]. *Transactions of ASME*, 1954, 76(2):217-225.
- [18] Hahn R. On the temperature developed at the shear plane in the metal cutting process [J]. *National Congress of Applied Mechanics*, 1951, 18(3):661-666.
- [19] Weiner J H. Shear plane temperature distribution in orthogonal machining [J]. *Transactions of ASME*, 1955, 77(8):1331-1336.
- [20] 张增增. 高温地层PDC切削齿碎岩过程中热损伤及温度场热应力场的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.  
ZHANG Zengzeng. Study on thermal damage and temperature field and thermal stress field of PDC cutter breaking rock in high temperature formation [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [21] 李晓红, 杨晓峰, 卢义玉, 等. 水射流辅助硬质合金钻头切割岩石过程的刀具温度分析 [J]. *煤炭学报*, 2010, 35(5):844-849.  
LI Xiaohong, YANG Xiaofeng, LU Yiyu, et al. Temperature

- analysis of cemented carbide drill cutting rock associated with water jet[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 844-849.
- [22] 杨晓峰,李晓红,卢义玉. 岩石钻掘过程中的钻头温度分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10): 3164-3169.  
YANG Xiaofeng, LI Xiaohong, LU Yiyu. Temperature analysis of drill bit in rock drilling[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2011, 42(10): 3164-3169.
- [23] Gao K P, Xu X X, Jiao S J, et al. Modeling and experimental research on temperature field of full-sized PDC bits in rock drilling and coring[J]. Energy Reports, 2022, 8: 8928-8938.
- [24] Zhang Z Z, Zhao D J, Zhao Y, et al. Simulation and experimental study on temperature and stress field of full-sized PDC bits in rock breaking process[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 186: 106679.
- [25] 王海根. 模拟月岩条件下钻进过程中热传递机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.  
WANG Haigen. The researches on the mechanism of heat transfer in the process of drilling under the condition of simulated lunar rock[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2015.
- [26] 何录忠. 月表取心钻头旋转切削热分析及模拟实验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.  
HE Luzhong. Cutting thermal analysis and simulated experimental study of lunar surface coring drill[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2015.
- [27] 刘春朋. 冰层回转钻进切削热分析与实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
LIU Chunpeng. Thermal analysis and experimental study on ice core drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [28] 董硕. 冰层回转钻进切削具温度场数值模拟与实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.  
DONG Shuo. Numerical simulation and experimental study on cutting tool temperature field in ice rotary drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [29] Komanduri R, Hou Z B. Thermal modeling of the metal cutting process: part I-temperature rise distribution due to shear plane heat source[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(9): 1715-1752.
- [30] Komanduri R, Hou Z B. Thermal modeling of the metal cutting process-part II: temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool - chip interface[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(1): 57-88.
- [31] 吴海东. 高温条件下金刚石钻头钻进实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.  
WU Haidong. Experimental research on diamond bit drilling under high temperature[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [32] 沈立娜,李春,赵义,等. 金刚石取心钻头干钻热特性试验研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 62-67.  
SHEN Lina, LI Chun, ZHAO Yi, et al. Experimental study on the thermal characteristics of dry drilling of diamond coring bits[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 62-67.
- [33] 常思,刘宝昌,韩哲,等. 热-机碎岩孕镶金刚石钻头的设计及试验研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(2): 77-84.  
CHANG Si, LIU Baochang, HAN Zhe, et al. Design and test of the impregnated diamond drill bit assisted by frictional heat[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(2): 77-84.
- [34] 王悦,张凯,李其州,等. 超高速下单粒金刚石与岩石相互作用响应的研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 21-29.  
WANG Yue, ZHANG Kai, LI Qizhou, et al. Research on the response of single diamond particles and rock interaction at ultra-high speed[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 21-29.
- [35] 左龙. 孕镶金刚石钻头切削力学研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.  
ZUO Long. Study on cutting mechanics of impregnated diamond bits[D]. Chengdu: SouthWest Petroleum University, 2015.
- [36] 杨光录. 孕镶金刚石钻头碎岩过程的理论分析及模拟试验研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2014(5): 137-138.  
YANG Guanglu. Theoretical analysis and simulation test research on the rock crushing process of embedded diamond drill bits[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2014(5): 137-138.
- [37] 赵建康,曲敬信,邓福铭. 孕镶金刚石钻头工作温升的理论分析[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(4): 57-59.  
ZHAO Jiankang, QU Jingxin, DENG Fuming. Theoretical study on temperature rising of the diamond bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2004, 32(4): 57-59.

(编辑 王跃伟)