

岩石取芯切削钻进过程温度分析与试验研究

钱磊, 王晓川, 康勇, 马志伟, 向美景

(武汉大学水射流理论与新技术湖北省重点实验室, 湖北武汉, 430072)

摘要: 为深入研究取芯钻钻头在钻进过程中的温度变化规律, 归纳影响钻头温度的各类参数, 建立钻头温度解析计算模型; 结合红外热像仪, 实现取芯钻工作条件下钻头温度的定性分析。研究表明: 摩擦热占据取芯钻热功转换的绝大部分, 在其他条件不变的情况下, 增加进给力能够加大钻头的摩擦热, 温度明显增加; 增大钻头的尺寸和转速, 使钻头发生更剧烈的剪切和摩擦, 从而温度增大。钻头的进给力、尺寸和转速与钻头温度呈现明显的正相关特性, 而决定剪切热的主切削力则对温度的影响变化不显著。试验中岩石切屑对观测结果有一定影响, 但试验结果与理论计算结果基本相符。

关键词: 取芯钻; 钻进; 剪切; 摩擦; 温度解析计算

中图分类号: TD80

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



文章编号: 1672-7207(2020)05-1402-08

Temperature analysis and experimental study of core drill cutting and drilling process

QIAN Lei, WANG Xiaochuan, KANG Yong, MA Zhiwei, XIANG Meijing

(Hubei Key Laboratory of Waterjet Theory and New Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to study the temperature variation rule of coring bit during drilling, various parameters affecting the temperature of the bit were generalized, and the analytical calculation model of bit temperature was established. The bit temperature under working conditions of core drilling with infrared thermal imager was analyzed. The results show that the frictional heat accounts for the vast majority of the core work. With other conditions unchanged, increasing the feed force can increase the friction heat of the drill bit and the temperature increases significantly. Increasing the size and speed of the drill bit, makes the drill bit more severe shear and friction, the temperature increases. The feed force, size and rotation speed of the drill bit have obviously positively correlation characteristics with the temperature of the drill bit, while the main cutting force that determines the shear heat has no significant effect on the temperature. The rock chip in the test has certain influence on the observation, but the test results basically accord with the theoretical calculation.

Key words: core drill; drilling; cutting; friction; temperature analytical calculation

收稿日期: 2019-08-20; 修回日期: 2019-10-18

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划项目(2018YFC0808401) (Project(2018YFC0808401) supported by the National Key Research and Development Program of China)

通信作者: 王晓川, 博士, 副教授, 从事水射流理论与技术及其在矿业工程中的应用研究; E-mail: xcw001@whu.edu.cn

随着地球陆地资源日益紧张,为追求丰富的矿产资源和能源,不少国家将目光投向了深海与太空。海洋拥有极为重要的矿产资源,例如富含钴且稀土元素含量很高的钴结壳,距离地球最近的天体月球则具有很大的开发潜力^[1]。岩芯样品是地质学家研究地质形态、地层演变规律和成矿特点等问题的重要手段和途径。岩石取芯钻探一直都是地下工程勘测过程中获取地质基础资料最为广泛的手段与重要方法。在岩石钻进过程中会不可避免地穿越坚硬岩层使得钻头温度升高,过高的温度不但会使钻头材质发生变性,而且产生的热应力也会超出材质的许用强度,使钻头过早失效,使用寿命下降^[2],进而影响施工进度,增加工程经济成本。然而,与其他钻头不同的是,取芯切削刃即表镶和孕镶金刚石钻头钻进主要以研磨破岩的方式^[3],连续研磨、刻划以及犁削岩石,从而达到破碎岩石的目的。研究表明钻头在切削过程中,绝大部分机械功将会转化为热量,造成钻头的温度迅速地升高。BESTE等^[4]研究了钻头表面处于工作状态的平均温度;但LARSEN-BASSE^[5]在研究钻头工作后的材料物性时发现存在一些局部瞬时温度超过1 000 °C高温形成相。李晓红等^[6]指出刀具失效的主要的因素为热温损伤。YELLOWLEY等^[7-8]也证实了这一点。COZ等^[9]认为工作界面的热负荷会产生相变并产生高的残余应力。深入研究岩石取芯钻进过程热温变化规律,对避免取芯钻头失效和提高钻头使用寿命具有现实意义。然而,取芯空心钻与其他钻头在结构方面存在差异性,直接搬用现有模型计算结果尚待商榷^[10]。本文作者拟以金刚石取芯钻为研究对象,在理论分析的基础上建立基于取芯钻的温度解析计算模型,利用红外热像仪进行取芯钻进试验,对比理论模型与试验,归纳出影响钻头热温变化的关键因素。

1 钻头温度解析计算

在取芯钻进破岩过程中,钻进的力学过程可以分为2部分,即钻压作用下金刚石颗粒对岩石的压入和扭矩作用下金刚石切削刃对岩石的切削作用,如图1所示。图1中, v 为钻头进给速度, w 为

钻头转速, P 为钻头进给力, H 为钻头切削力。切屑在取芯钻和岩石块的震动与摩擦中碾压成粉末,随着冷却液排出。在这个过程中,钻头温升主要来源于岩石发生剪切破坏产生的剪切热以及钻头与岩石及其切屑摩擦产生的摩擦热。

研究金刚石破岩机理时,以单粒金刚石为研究对象。在钻压作用下,金刚石压入岩石并以微切削的方式破岩,使岩石处于极高的应力状态并呈现塑性,同时,在旋转扭矩的作用下,金刚石产生切削作用,破碎岩石的体积大体上等于金刚石嵌入岩石的位移体积。由于金刚石破碎岩石作用的复杂性,国内外学者将其分为磨削、切削和压碎等理论。对于孕镶钻头,认为钻进破岩过程与砂轮的磨削过程相似。而表镶钻头破碎软岩,则主要靠剪切和切削作用,破碎岩石的过程与切削破岩的过程相似^[3]。

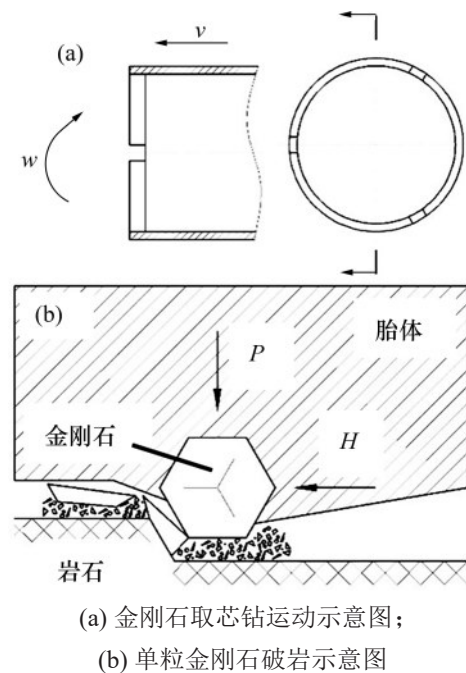


图1 取芯钻运动及钻进示意图

Fig. 1 Schematic diagram of core drill movement and drilling into rock

1.1 剪切热解析计算

根据莫尔强度理论,钻头对岩体施加压力,其内部某一截面上剪应力到达极限值从而发生剪切破坏^[11]。剪切破坏产生的热传递到钻头使其温度升高。单位时间、单位面积内岩石剪切面上产生的剪切热 q_1 为^[12-13]

$$q_1 = \frac{F_j v_j}{UZcsc\phi} \quad (1)$$

式中: F_j 为剪切力; v_j 为剪切速度; U 为压入刃宽度; Z 为剪切厚度; ϕ 为剪切角。

设剪切热流入刀具的比率为 R_1 , 根据比热容计算公式, 剪切面附近切屑的平均温升 ΔT_j 为

$$\Delta T_j = \frac{(1 - R_1)q_1(UZcsc\phi)}{c_1 \rho_1 [v_j \frac{\cos(\phi - \alpha)}{\cos\alpha} UZ]} \quad (2)$$

式中: c_1 为岩石比热容; ρ_1 为岩石密度; α 为刀具前角。

根据 JAEGER^[12] 的移动摩擦表面与平面作用模型, 刀具的平均温升 ΔT_j 为

$$\Delta T_j = 0.754R_1 q_1 \frac{Zcsc\phi}{2k_1 \sqrt{\frac{v_j \gamma Zcsc\phi}{4K_1}}} \quad (3)$$

式中: k_1 为岩石的导热系数; K_1 为岩石的导温系数。剪切区的相对滑移系数 γ 为

$$\gamma = \frac{\cos\alpha}{\sin\phi \cos(\phi - \alpha)} \quad (4)$$

根据 BLOK 的温度准则^[13], 两接触面上的温度相等, 联立式(2)与(3)求得热量传递比率 R_1 为

$$R_1 = \frac{\cos\alpha \sqrt{K_1 \gamma}}{\cos\alpha \sqrt{K_1 \gamma} + 0.754c_1 \rho_1 \cos(\phi - \alpha) \sqrt{Zv_j \sin\phi}} \quad (5)$$

则剪切面上的平均温升 ΔT_j 为

$$\Delta T_j = \frac{0.754q_1 ZK_1 \sqrt{\gamma csc\phi}}{[\cos\alpha \sqrt{K_1 \gamma} + 0.754c_1 \rho_1 \cos(\phi - \alpha) \sqrt{Zv_j \sin\phi}] k_1 \sqrt{v_j \gamma Z}} \quad (6)$$

1.2 摩擦热解析计算

将钻头与岩石看成一个系统, 根据能量守恒定律, 两者之间的摩擦做功转换为热量, 即所求摩擦热 q_2 。

1.2.1 前刀面与切屑的摩擦

前刀面因摩擦力做功而产生热量 q_2 为

$$q_2 = \frac{F_c v_c}{Us} \quad (7)$$

式中: F_c 为前刀面摩擦力; v_c 为摩擦速度; s 为切屑与前刀面的摩擦接触长度。

设剪切热流入切屑的比率为 R_2 , 根据 JAEGER^[12] 的移动摩擦表面与平面作用模型, 刀具的平均温升 ΔT_f 为

$$\Delta T_f = \frac{0.754R_2 q_2 s}{2k_2 \sqrt{\frac{v_c s}{4K_2}}} \quad (8)$$

式中: k_2 为岩石切屑的导热系数; K_2 为岩石切屑的导温系数; v_c 为岩石与刀具的摩擦速度。

根据 SHAW 等^[14] 的分析, 把切屑看成固定的连续摩擦热源, 前刀面平均温升 ΔT_f 为

$$\Delta T_f = \frac{(1 - R_2)q_2 s}{2k_3} A \quad (9)$$

式中: k_3 为刀具材料的导热系数; A 为移动平面热源的形状系数^[15],

$$A = \frac{2}{\pi} \left[\arcsin\left(\frac{U}{s}\right) + \left(\frac{U}{s}\right) \arccos\left(\frac{s}{U}\right) - \frac{1}{3} \left(\frac{U}{s}\right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{s}{U}\right) - \frac{1}{3} \left(\frac{s}{U} + \frac{U}{s}\right) \sqrt{1 + \left(\frac{U}{s}\right)^2} \right] \quad (10)$$

两接触面上的温度应相等, 联立式(8)与(9)求得热量传递比率 R_2 为

$$R_2 = \frac{k_2 A \sqrt{v_c s}}{1.508k_3 \sqrt{K_2} + k_2 A \sqrt{v_c s}} \quad (11)$$

故前刀面与切屑的摩擦造成的的平均温度升高的解析计算公式为

$$\Delta T_f = \frac{0.754sA \sqrt{K_2} q_2}{1.508k_3 \sqrt{K_2} + k_2 A \sqrt{v_c s}} \quad (12)$$

1.2.2 钻头底面和侧面与岩石的摩擦

钻头底面摩擦力 f_1 为

$$f_1 = \mu_1 F \quad (13)$$

钻头侧面摩擦力 f_2 为

$$f_2 = \mu_2 P = \frac{\mu_2 M}{2\pi R'} \quad (14)$$

式中: μ_1 为钻头底面与岩石的摩擦因数; F 为钻头对岩石的压力; μ_2 为钻头侧面与岩石的摩擦因数; P 为钻头侧面压力; M 为钻头扭矩; R' 为钻头侧面的当量摩擦半径。

单位时间钻头摩擦生成的热 q_3 为

$$q_3 = f_1 v + f_2 v = 2\pi\mu_1 FRN + \frac{\mu_2 MRN}{R'} \quad (15)$$

式中: R 为钻头外径; N 为钻头转速。

根据比热容公式, 由摩擦造成的平均温升 ΔT_Q 为

$$\Delta T_Q = \frac{2\pi\mu_1 FRN + \frac{\mu_2 MRN}{R'}}{c_3 m_3} \quad (16)$$

式中: c_3 为钻头的比热容; m_3 为钻头的质量。

故单位时间单位面积上由剪切和摩擦造成的平均温度升高 ΔT 为

$$\Delta T = \Delta T_J + \Delta T_F + \Delta T_Q = \frac{0.754q_1 Z K_1 \sqrt{\gamma \csc \phi}}{[\cos \alpha \sqrt{K_1 \gamma} + 0.754c_1 \rho_1 \cos \cos(\phi - \alpha) \sqrt{Z v_j \sin \phi}] k_1 \sqrt{v_j} Z} + \frac{0.754 S A \sqrt{K_2} q_2}{1.508 k_3 \sqrt{K_2} + k_2 A \sqrt{v_c s}} + \frac{2\pi \mu_1 F R N + \frac{\mu_2 M R N}{R'}}{c_3 m_3} \quad (17)$$

2 试验与分析

2.1 试验

通过对钻头的受力分析和对式(17)的观察, 可以初步认为主切削力 F_p 、进给力 F_Q 、钻头转速 N 和钻头半径 R 是影响钻头在工作条件下平均温度升高的主要影响因素。不合适的工作温度会造成金刚石磨损异常, 并在钻头钻削面上形成斜刃^[16]。现拟通过相关试验确定并验证上述参数对钻头温度的影响, 同时检验钻头温度解析计算模型的正确性。

由于取芯钻空心圆筒的形状特殊, 测温传感器无处安放, 直接并且准确地获得工作表面的温度十分困难。杨晓峰等^[10]根据物体各部分温度的差异导致其向外辐射的红外能量特征出现的差异, 利用红外热像仪对物体温度实现非接触式测量。

试验中, 取芯钻在工作时, 须深入岩石内部, 红外热像仪并不能够直接捕捉钻头温度。设计取芯钻钻头在不同尺度下进行钻进, 即钻头在岩石边缘进行钻进, 部分裸露在外, 这样, 红外热像仪将能够直接监测到钻头的工作温度。试验系统布置如图2所示。

本次试验材料采取混凝土, 设备采用德国英福泰克新推出高清级固定式红外热像仪 VarioCAM®HD head。在混凝土取芯钻钻进过程中, 通过控制设备参数, 可以有效地对钻进温度进行测量、收集和分析。

2.2 试验结果分析

设计了取芯钻钻头在岩石边缘进行钻进试验, 即将部分钻头暴露出来, 使得红外热像仪能够直接捕捉钻头温度, 待温度趋于稳定后将记录钻头的最高温度。考虑空气与钻头的热量交换, 实际

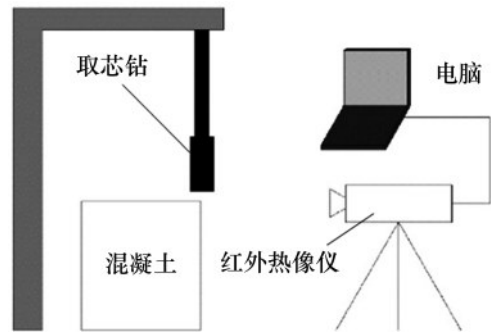


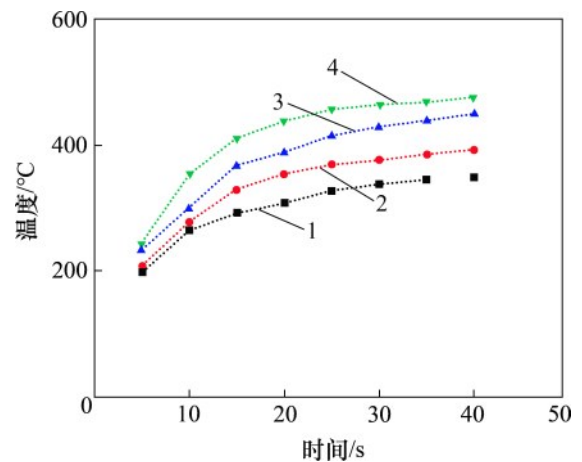
图2 试验系统布置图

Fig. 2 Schematic diagram of test system

工况钻头温度会比试验温度大, 但相对来说, 温度的变化趋势并不会会有太大改变。

2.2.1 进给速度对钻头温度的影响

主切削力和进给力由负载确定, 不易控制和测量。然而, 钻头的进给速度侧面反映进给力的大小。在其他条件不变的情况下, 进给速度随着进给力的增大而增大^[17]。对3种钻头都进行进给速度对照实验, 直径为25 mm的钻头在不同进给速度下最高温度变化趋势如图3所示。



进给速度/(m·h⁻¹): 1—0.6; 2—0.8; 3—1.0; 4—1.2。

图3 取芯钻头在不同进给速度下温度变化曲线图

Fig. 3 Temperature variation curves of coring bit with different feed speeds

从图3可以看出: 钻进初期钻头温度迅速上升, 到中期上升缓慢, 后期在某一时刻达到稳定温度然后保持平衡, 达到平衡后的钻头温度与进给速度基本呈现正相关特性。与LI等^[18]研究麻花钻“进给速度越慢, 钻头温度越高”这一结论不同的是, 3组不同直径取芯钻钻头在同一种给进截面下, 增加钻进速度, 钻进压力增大, 温度也随

之明显升高, 与理论计算结果相符合。

取芯钻钻头的金刚石在切削岩石时, 受到变形抗力和摩擦力的作用, 这些力的合力称为切削合力, 也叫总切削力。总切削力可分解成3个相互垂直的分力: 主切削力 F_p , 进给力 F_Q 和背向力 F_r 。以钻头为研究对象进行受力分析, 钻头受到设备给予的驱动力与岩石的反作用力大小相等, 故钻头的主切削力 F_p 和进给力 F_Q 可由钻头受到的扭矩和推力得出。

在实际应用中, 钻头的主切削力 F_p 和进给力 F_Q 由负载决定。现根据推出的温度解析计算公式, 代入相关试验参数, 研究主切削力 F_p 和进给力 F_Q 对温度变化的影响。当其他条件一定时, 温度变化趋势与主切削力 F_p 和进给力 F_Q 的关系如图4所示。

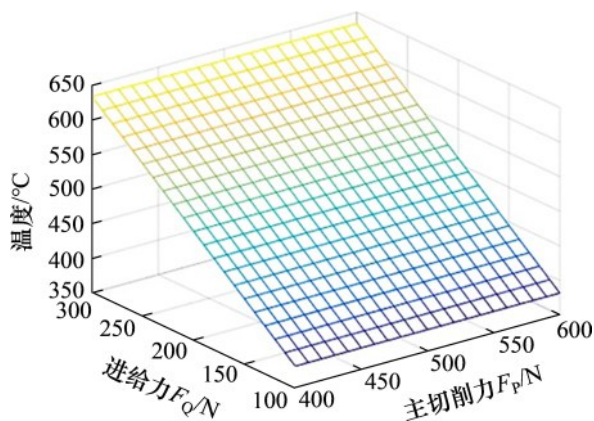


图4 主切削力 F_p 和进给力 F_Q 对温度的影响

Fig. 4 Effect of main cutting force F_p and feed force F_Q on temperature

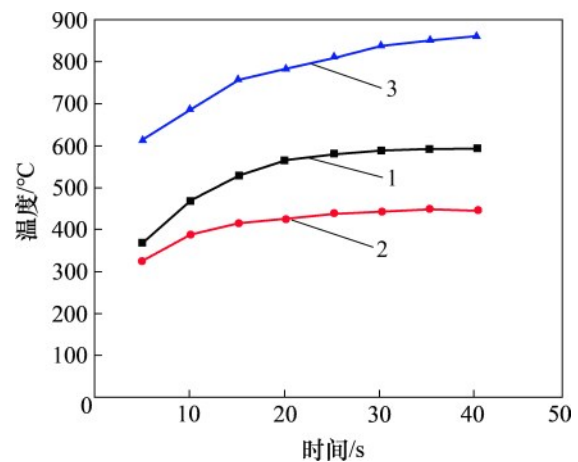
从图4可以看出: 当其他条件一定时, 温度对一定范围内主切削力 F_p 的改变并不敏感, 其变化趋于平缓。这是因为, 从机理来说, 表镶和孕镶金刚石钻头钻进主要以研磨碎岩方式, 即金刚石颗粒在垂直力和水平力作用下, 连续研磨、刻划以及犁削岩石, 从而达到破碎岩石的目的。从解析表达式来看, 主切削力 F_p 主要影响的是钻头的剪切热量 q_1 。然而, 由于金刚石小尺寸的刻划及犁削作用, 其剪切带来的温度变化不随主切削力 F_p 的变化而发生明显改变, 也不如钻头摩擦造成的温度升高影响大。

另一方面, 温度变化随着进给力 F_Q 的增大而增大, 其变化趋势不受主切削力 F_p 改变的影响。从受力分析来看, 进给力 F_Q 决定了取芯钻钻头底

面与岩石之间的摩擦力, 进而改变由摩擦力产生的热量。钻头在钻进过程中的机械能大部分转换为系统的内能, 与进给力产生的摩擦热不同的是, 由主切削力造成的岩屑新表面能只占能量转换的很小比例, 因此, 钻头在钻入岩石中出现的明显热效应现象主要由进给力产生。

2.2.2 钻头尺寸对钻头温度的影响

取时间间隔为5 s, 不同直径的钻头最高温度变化趋势如图5所示。

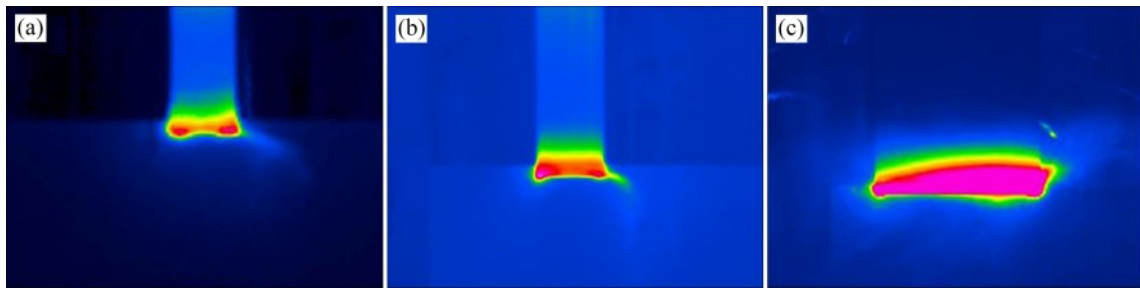


钻头直径/mm: 1—25; 2—50; 3—100。

图5 不同直径钻头温度变化曲线图

Fig. 5 Temperature variation curves of drills with different diameters

从图5可以看出: 与理论计算结果不同的是, 随着钻头直径的增大, 钻头的温度先降低后升高。直径小的钻头温度稍高是因为其尺寸小, 散热较慢; 随着钻头直径的增大, 切屑也随之增加, 覆盖到钻头上, 阻挡了热像仪拍照探测钻头的实际温度, 切屑温度低于钻头实际温度。由于钻头工作时需钻入岩石内部, 红外热像仪不能直接捕捉钻头温度, 于是, 根据采取的手段所获取的试验结果是实际结果的近似值, 其一系列结果均存在相应的误差, 但温度的变化趋势可以从这些结果之间的变化进行说明。这些误差属于系统误差, 在相同试验条件下误差不会发生改变, 如图6所示。从图6(a)可见25 mm直径钻头两侧温度基本保持一致; 从图6(b)可见50 mm直径钻头温度偏向一侧延伸, 温度较低一侧有切屑带出的拖尾, 可以明显发现拖尾一侧钻头温度要比另一侧的低。因为小直径的钻头所产生的切屑较其他2种直径钻头产生的切屑更少, 切屑温度带来的误差也随之更



钻头直径/mm: (a) 25; (b) 50; (c) 100

图 6 红外热像仪监测不同直径取芯钻头工作过程温度变化

Fig. 6 Temperature images of working process of drills with different diameters monitored by infrared camera

小, 钻头集中更多的热功转化, 使得钻头温度变化趋势更加清晰、明显。

因本试验为干切削, 处于无水环境, 试验中, 当钻头选取直径为 100 mm 时(如图 6(c)所示), 红外热像仪拍摄图片显示钻头温度很高, 空气对其冷却作用极其有限, 并且钻削过程中有火花出现, 钻头发红现象明显。这是因为钻头大部分温度达到了金刚石的燃点, 钻头内部的金刚石发生燃烧, 产生了火光, 符合 GORELIKOV 等^[9]的研究结果, 即随着钻头基体温度达到 800 °C 以上, 金刚石开始燃烧。在实际应用中, 采取添加钻井液进行降温, 能够有效控制钻头温度, 使其温度发生在金刚石燃点以下, 以确保钻头的使用寿命。

取芯钻尺寸会导致钻头与岩石摩擦接触长度发生变化, 金刚石的剪切速度随尺寸的增大而增大, 而钻头的转速决定了做功的程度。

2.2.3 钻头转速对钻头温度的影响

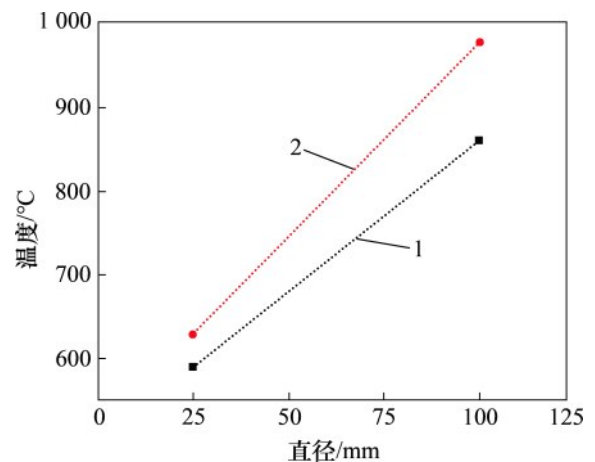
忽略存在系统误差的试验数据, 选取直径为 25 mm 和 100 mm 的钻头, 分别记录不同转速下达到平衡时的钻头温度, 如图 7 所示。

从图 7 可以看出: 在更高转速下, 钻头温度的上升幅度更大, 符合理论计算结果。这是因为在切割同样体积的岩石时, 更高的转速使得设备的负载增大, 同时也使做功变得更快, 于是, 转化为热功的能量比增加钻头直径时需要的能量更多。从解析表达式可以看出: 钻头的转速和半径都影响着钻头摩擦产生的热量, 其影响程度应该是相同的, 但转速拥有更大的取值范围, 故其造成的温升上限也更高。

根据推出的温度解析计算公式, 代入相关试验参数, 研究钻头转速 N 和钻头半径 R 对温度变化

的影响。当其他条件一定时, 温度变化趋势与钻头转速 N 和钻头半径 R 的关系如图 8 所示。

从图 8 可以看出: 当其他条件一定时, 温度随转速的增加而增加, 其变化幅度随钻头半径变化



转速/(r·min⁻¹): 1—1 500; 2—3 000。

图 7 不同直径在不同转速下钻头温度变化折线图

Fig. 7 Temperature variation curve with different diameters at different rotating speeds

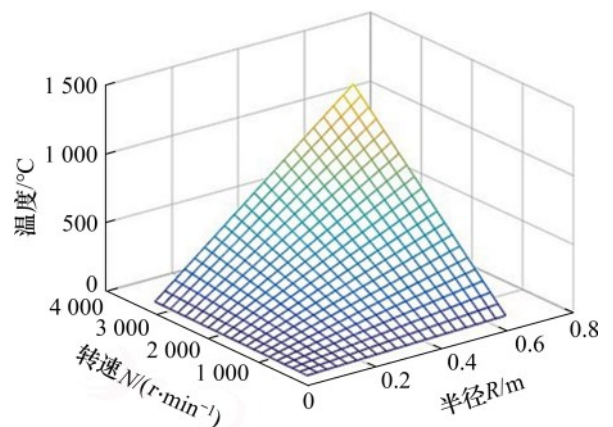


图 8 钻头转速 N 和钻头半径 R 对温度的影响

Fig. 8 Effect of bit speed N and bit radius R on temperature

而变化, 钻头半径越大, 温度上升趋势就越快; 同样地, 当其他条件一定时, 温度随半径的增加而增加, 其变化幅度随钻头转速变化而变化, 钻头转速越快, 温度上升趋势就越快。当其他参数不变时, 温度与钻头转速呈现明显正相关关系^[20]。这是因为, 从解析表达式来看, 金刚石的切削速度受钻头转速和半径的影响, 其转速和尺寸越大, 剪切发生越快。同时, 钻头的转速和半径决定了相同时间内转化成热量所需功, 这充分说明了对钻头温度影响最大的是切削速度^[21]。

3 结论

1) 建立了取芯钻在钻进过程中钻头温度解析计算模型, 分析了参数之间相互作用与对温度的影响关系, 可为之后的研究提供理论基础。

2) 利用红外热像仪监测取芯钻干钻削工作条件下的钻头温度, 试验结果基本符合钻头温度解析计算模型结果。在干切削情况下, 被钻头切削、碾磨的切屑会覆盖在钻头表面, 试验存在系统误差, 对结果的观测有一定的影响。

3) 在工程应用中, 主切削力与进给力由设备提供, 切削速度与钻头尺寸有关, 都对钻头温度产生较大的影响。当钻头温度达到金刚石的燃点时, 钻头开始损坏, 同时, 工作状况也变得不稳定, 应根据实际要求控制钻进和钻削速度, 并添加钻井液, 避免钻头温度过高导致的失效报废以及可能存在的安全问题。

参考文献:

- [1] KATO Y, FUJINAGA K, NAKAMURA K, et al. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(8): 535–539.
- [2] 黄道远, 易丹青, 刘会群, 等. 硬质合金强度随温度的变化及失效机理的研究[J]. *材料热处理学报*, 2007, 28(5): 105–108.
HUANG Daoyuan, YI Danqing, LIU Huiqun, et al. Effect of temperature on bending strength and failure mechanism of cemented carbide[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2007, 28(5): 105–108.
- [3] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 224–228.
XU Xiaohu, YU Jing. *Rock fragmentation*[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984: 224–228.
- [4] BESTE U, HARTZELL T, ENGQVIST H, et al. Surface damage on cemented carbide rock-drill buttons[J]. *Wear*, 2001, 249(3/4): 324–329.
- [5] LARSEN-BASSE J. Wear of hard-metals in rock drilling: a survey of the literature[J]. *Powder Metallurgy*, 1973, 16(31): 1–32.
- [6] 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.
- [7] YELLOWLEY I, BARROW G. The influence of thermal cycling on tool life in peripheral milling[J]. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1976, 16(1): 1–12.
- [8] BHATIA S M, PANDEY P C, SHAH H S. Failure of cemented carbide tools in intermittent cutting[J]. *Precision Engineering*, 1979, 1(3): 148–152.
- [9] LE COZ G, MARINESCU M, DEVILLEZ A, et al. Measuring temperature of rotating cutting tools: application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 36: 434–441.
- [10] 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.
- [11] 张绍和, 鲁凡. 金刚石钻头参数设计规律[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2004, 35(2): 195–200.
ZHANG Shaohu, LU Fan. Designing method about parameters of impregnated diamond bit[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2004, 35(2): 195–200.
- [12] JAEGER J C. Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts[J]. *Proceedings of the Royal Society of New South Wales*, 1942, 76: 203–224.
- [13] BLOK H. Theoretical study of temperature rise at surfaces of actual contact under oiliness lubricating conditions[C]// *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers General Discussion of Lubrication*. London: IMechE, 1937: 222–235.
- [14] SHAW M C, COOKSON J O. Metal cutting principles[J]. *Tribology International*, 1985, 18(1): 55.
- [15] SHAW M C. *Metal cutting principles*[M]. Oxford: Thetford

- Press Limited, 1984: 265.
- [16] GORELIKOV V G. Analysis of the wear mechanism of diamond bits when drilling wells in rock[J]. Notes of the Mining Institute (St. Petersburg), 2011, 189: 179–181.
- [17] PENG Xiaogan, ZENG Ting, YIN Zhongwang, et al. Experimental study on drilling basalt with small diameter drilling tools[J]. Advances in Space Research, 2019, 64(5): 1177–1187.
- [18] LI Changhe, ZHAO Huayang, MA Hongliang, et al. Simulation study on effect of cutting parameters and cooling mode on bone-drilling temperature field of superhard drill[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9/10/11/12): 2027–2038.
- [19] GORELIKOV V G, LYKOV Y V, GORSHKOV L K. Investigation of thermal operational regimes for diamond bit drilling operations[J]. International Journal of Engineering, 2019, 32(5): 790–793.
- [20] 何录忠. 月表取芯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)工程技术学院, 2015: 34–35.
- HE Luzhong, Cutting thermal analysis and simulated experimental study of lunar surface coring drill[D]. Beijing: China University of Geosciences. School of Engineering and Technology, 2015: 34–35.
- [21] 邱坤, 王新永, 庞思勤. 镍基铸造高温合金K24的切削温度实验研究[J]. 功能材料, 2012, 43(6): 692–695.
- QIU Kun, WANG Xinyong, PANG Siqin. Cast nickel-base superalloy K24 study of cutting temperature[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(6): 692–695.

(编辑 杨幼平)