

碟形滚刀振动切削破岩的温度特性^{*}

江红祥^{1,2}, 张晓迪¹, 宋 申¹, 龙智武¹

(1. 中国矿业大学机电学院 徐州, 221116)

(2. 矿山智能采掘装备省部共建协同创新中心 徐州, 221008)

摘要 切削温度是影响机械破岩刀具磨损特性及服役寿命的核心因素,外部激振辅助碟形滚刀虽可提升破岩性能,但振动破岩过程中滚刀切削温度演变规律尚不明确。针对这一问题,基于热力耦合数值仿真与实验验证,开展滚刀振动破岩切削温度变化规律及影响机制研究。首先,在滚刀振动破岩有限元模型中引入热力耦合作用,通过数值模拟分析切削温度动态变化特征;其次,开展室内振动破岩实验,采用红外热像仪实时监测滚刀切削温度;然后,对比实验与仿真数据,验证数值模型模拟切削温度的可靠性;最后,结合温度时程曲线与岩石破碎形貌,剖析不同参数对切削温度的影响机理。结果表明:振动破岩时滚刀切削温度呈阶跃式增长,岩石破碎坑形成后滚刀与岩石处于无接触或弱接触状态,最大切削温度会小幅下降;切削速度与切削温度呈正相关规律,温度随切削时间呈幂函数变化;切削温度随激振频率升高呈线性增大趋势,90 Hz 工况下切削温度为 50 Hz 的 1.4 倍;岩石强度可改变切削温度变化机制,岩石强度越高,温度增长由平稳攀升转为显著阶跃波动变化。相较于切削速度和激振频率,岩石强度对滚刀振动破岩切削温度的影响最为显著。

关键词 碟形滚刀;振动切削;切削温度;数值模型

中图分类号 TH11;TD42

1 问题的引出

随着我国矿山巷道、交通隧道、地铁、引水涵洞等地下空间工程增多,对地下岩体开挖和掘进装备的工作效率提出了更高要求。现有常用的岩石掘进装备主要包括悬臂式掘进机和全断面隧道掘进机,分别以截齿和滚刀为刀具。然而,在高强度(岩石单轴抗压强度 >80 MPa)、强磨蚀性岩石工况下服役时,两种刀具磨损失效情况均较为严重。基于此,Ramezanzadeh 等^[1]在盘形滚刀的结构基础上,通过改变其破岩模式提出了碟形滚刀切削破岩的方法,并证实该方法可充分发挥刀具对岩石的拉伸破坏作用,有效降低破岩载荷。盘形滚刀滚压破岩和碟形滚刀切削破岩如图 1 所示。

为进一步提高机械刀具破碎硬岩性能,结合碟形滚刀的破岩方式特点,有学者提出了通过振动辅助的方式进一步提高机械刀具的破岩性能^[2-4],并已初步进行工业试验^[5-6]。振动辅助碟形滚刀破岩的原理是通过偏心激振装置给滚刀在切削方向上周期性地施加激振力,其示意图如图 2 所示。相关学者

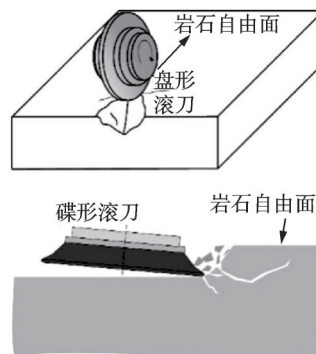


图 1 盘形滚刀滚压破岩和碟形滚刀切削破岩

Fig.1 Rock cutting by disc cutter at a rolling mode and disk shape cutter at an undercutting mode

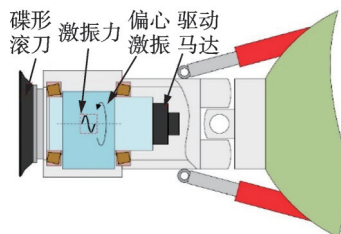


图 2 碟形滚刀振动破岩结构示意图

Fig.2 Schematic of vibrational cutting rock by disk shape cutter

^{*} 国家自然科学基金面上资助项目(51975573);江苏省自然科学基金面上资助项目(BK20231497);江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

收稿日期:2024-08-16;修回日期:2024-12-09

分析了激振参数(包括激振频率、动态激振力、恒定牵引力等)对破岩性能的影响规律,并研究了滚刀振动切削破岩系统的动力学特性。

在机械刀具破岩过程中,由于摩擦力作用产生大量切削热导致刀具温度升高,显著影响了刀具的服役寿命^[7]。作为评价刀具破岩性能的另一重要指标,机械刀具破岩时的切削温度同样受到学者们的广泛关注和研究。Zhang等^[8]通过开展镐型截齿旋转破岩实验,对比了不同冷却状态下截齿破岩的温度以及截齿磨损量,证实切削热是加速刀具磨损的主要因素。文献[9-10]以隧道掘进机盘形滚刀为研究对象,明确了盘形滚刀破岩过程中切削热对滚刀磨损行为的影响,发现在切削温度较高时更易导致滚刀发生塑性磨损。Fan等^[11]探究了镐型截齿磨损对切削载荷和切削温度的影响,实验结果证实热疲劳和过载是导致镐型截齿磨损失效的主要因素。

在现有研究中,学者们主要关注碟形滚刀的破岩载荷、比能耗等指标,而针对振动破岩时碟形滚刀的温度分布、磨损特性等关注较少。振动辅助作用虽然已被证实能够大幅提高碟形滚刀的破岩性能,但在破岩过程中滚刀和岩石高频接触产生大量切削热,研究并掌握振动参数对碟形滚刀切削温度的影响规律,对确定合适的振动破岩参数,减小滚刀磨损以及延长刀具服役寿命等具有重要意义。

2 滚刀振动破岩热力耦合数值模型

随着数值模拟研究的不断深入,许多学者通过数值仿真开展机械刀具切削温度的相关研究,并证实了数值仿真方法的可行性以及模拟结果的有效性^[12-15]。本研究采用数值模拟的方法进一步开展碟形滚刀振动切削破岩的切削温度研究。

2.1 有限元热力学理论

开展碟形滚刀振动破岩切削温度研究须主要考虑产热和热传导两方面,以滚刀和岩石摩擦接触位置作为热源,滚刀内部温度分布函数和空间位置与传导时间之间的关系^[16]为

$$T=f(x,y,z,\tau) \quad (1)$$

滚刀内部任意一点的导热微分方程为

$$T=f(x,y,z,\tau)\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\dot{\Phi}=\rho c\frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (2)$$

其中: (x,y,z) 为滚刀内部空间坐标; τ 为时间; s ; T 为坐标 (x,y,z) 的温度($^{\circ}\text{C}$); λ 为滚刀材料的导热系

数($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); ρ 为滚刀材料密度(kg/m^3); c 为滚刀材料的比热容($\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$)。

考虑到滚刀内部无热源并且处于稳态,得到滚刀的导热微分方程为

$$\Delta^2 T=0 \quad (3)$$

划分滚刀和岩石网格为六面体8节点单元,滚刀内部坐标为 (x,y,z) 的单元温度 T 为

$$T=\sum_{i=1}^8 N_i T_i=NT^e \quad (4)$$

其中: N_i 为形函数; T_i 为节点温度($^{\circ}\text{C}$); N 为形函数矩阵; T^e 为单元节点向量。

采用加权余量法计算滚刀内部温度场,即

$$\iiint_R \left(\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right) dx dy dz - \iint_s \frac{\partial \tau}{\partial n} N_i dS = 0 \quad (5)$$

将边界条件代入式(5),可得滚刀内部温度场解析方程为

$$\sum_e \left(\iiint_R B^T B dV + \iint_s \frac{h}{k} N^T dS \right) T^e = \sum_e \iint_s \frac{h}{k} T_a N^T dS \quad (6)$$

其中: T_a 为节点温度($^{\circ}\text{C}$); h 为导热系数($\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$); B 为形函数单元节点矩阵。

2.2 碟形滚刀振动破岩数值模型构建

开展数值模拟研究的前提是对所建仿真模型的关键参数进行标定,采取缩比滚刀对振动辅助破岩过程开展实验研究,所建立碟形滚刀振动破岩热力耦合模型尺寸与实验中所用滚刀和岩石的尺寸一致(滚刀楔面角度为 45° 、直径为30 mm),碟形滚刀振动破岩数值模型如图3所示。

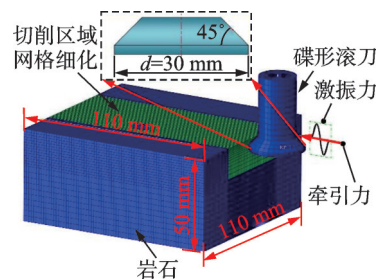


图3 碟形滚刀振动破岩数值模型

Fig.3 Numerical model of vibrational rock cutting by disk shape cutter

仿真过程中滚刀材料设置为线弹性本构模型,实验滚刀采用45钢,对其进行热处理提高其材料强度,仿真模型中的材料参数与实际参数一致,碟形滚刀材料本构参数如表1所示。

表1 碟形滚刀材料本构参数
Tab.1 Constitutive parameters of disc cutter material

45钢材料参数	数值
弹性模量/GPa	200
泊松比	0.26
密度/(kg·m ⁻³)	7 850
热导率/(W·(m·°C) ⁻¹)	48
比热容/(J·(kg·°C) ⁻¹)	450
热膨胀系数/(°C ⁻¹)	11.5×10 ⁻⁶

在仿真中设置激振力沿滚刀切削方向,并通过位移函数给滚刀施加边界条件,位移函数为

$$y=v_0t+A\sin(2\pi ft)$$
 (7)

其中:y为滚刀在切削上的位移(mm);v₀为滚刀初始速度(mm/s);t为仿真时间(s);A为滚刀振动振幅(mm);f为激振频率(Hz)。

在数值仿真中,岩石采用 Drucker-Prager 本构模型,设置岩石模型底面和两侧面为完全约束边界条件。同时,岩石与滚刀的接触破碎区进行网格加密处理。

2.3 数值模型力学参数校准

本研究对碟形滚刀切削破碎砂岩、大理岩和花岗岩这3种不同强度岩石时的切削温度开展研究,并分别对其模型参数进行标定。实验和仿真均采用国际岩石力学学会推荐的标准尺寸(∅50 mm×100 mm)岩石试样进行测试,以大理岩的单轴抗压强度标定结果为例,砂岩的单轴抗压强度测试对比结果如图4所示。仿真中3种岩石的力学参数如表2所示。

从对比结果中可见,仿真和实验的单轴抗压应力-应变曲线吻合程度较好,且岩石破坏形貌均呈现劈裂状,证实仿真中设置的参数可以较好地复现岩石的力学特性和破坏行为。

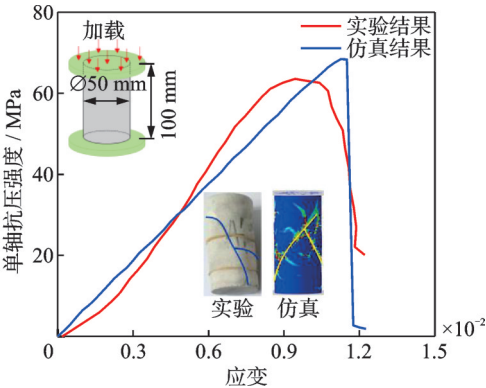


图4 砂岩的单轴抗压强度测试对比结果
Fig.4 Experimental and numerical results of uniaxial compression strength of sandstone

表2 仿真中3种岩石的力学参数
Tab.2 Mechanical parameters of 3 rocks in numerical model

参数	砂岩	大理岩	花岗岩
弹性模量/GPa	11.5	40.0	45.0
密度/(kg·m ⁻³)	2 800	2 700	2 850
抗压强度/MPa	63	110	135
泊松比	0.29	0.21	0.25
热导率/(W·(m·°C) ⁻¹)	2.9	3.5	3.15
比热容/(J·(kg·°C) ⁻¹)	700	800	800
内摩擦角/(°)	42.5	45	52.5

2.4 数值模型有效性验证

基于2.2节中所建立的滚刀振动切削破岩数值模型,搭建了如图5所示的滚刀振动破岩实验台,通过对比仿真切削温度与滚刀振动切削破岩实验结果,以进一步验证所建立的数值模型及热力学参数的有效性。在实验过程中,通过激振电机在切削方向上给滚刀施加周期激振力,并通过可变重物牵引滚刀进给;通过力传感器和位移传感器,分别获取实验过程中的破岩载荷和切削位移;实验过程中的滚刀切削温度通过红外热像仪进行动态监测。

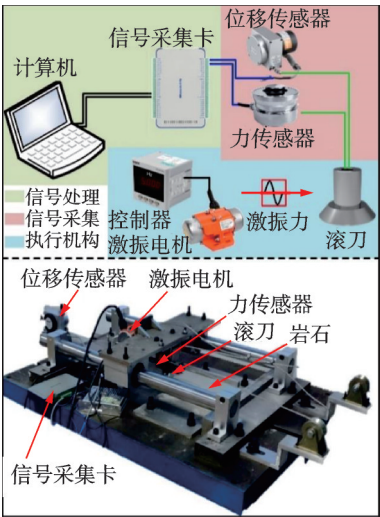


图5 碟形滚刀振动破岩实验装置及示意图
Fig.5 Testing device and schematic of vibrational rock cutting by disk shape cutter

在滚刀激振频率为 90 Hz 的条件下,15 mm 切削位移时的仿真和实验滚刀切削温度场分布如图6所示,仿真和实验滚刀切削温度对比结果如图7所示。通过数值模拟,便于监测振动切削破岩过程中滚刀温度场的分布与时变特性。从图6可见,滚刀与岩石接触位置温度明显升高,并且温度场由刀刃

向斜刀面呈梯度递减分布;由于一个振动周期内滚刀中间位置在切削方向上的贯入深度更大,因此该区域温升现象更加明显,并沿圆周方向对称向两侧递减。从图7中仿真切削温度结果可见,滚刀振动切削时温度变化规律与其运动形式一致,即随着切削位移的变化呈现阶跃特征。这主要是因为滚刀振动冲击碰撞岩石,与岩石之间为非连续接触;此外,岩石在受滚刀冲击碰撞时具有脆断特性,滚刀与岩石之间为非均匀接触。由图6可知,“刀-岩”接触位置产生的大量切削热导致了热量集中以及较高的切削温度。

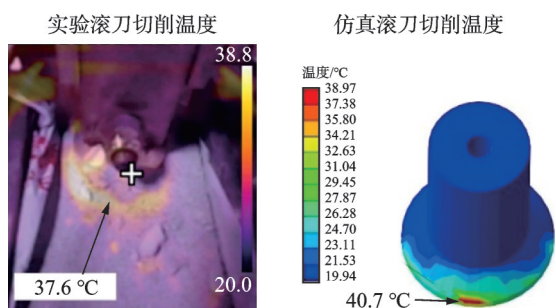


图6 15 mm切削位移时仿真和实验滚刀切削温度场分布
Fig.6 Experimental and numerical results of cutting temperature of disk shape cutter with 15 mm cutting displacement

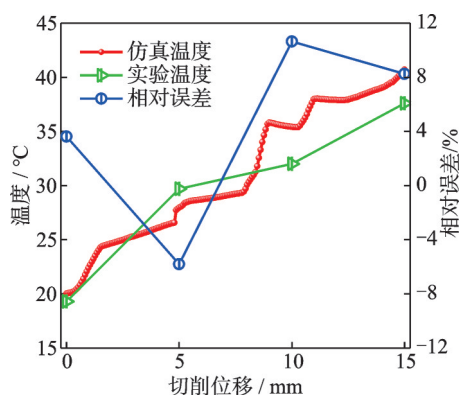


图7 仿真和实验滚刀切削温度对比结果
Fig.7 Comparing results of experimental and numerical cutting temperature

对比实验和仿真的切削温度结果可见,两者间的绝对温度差异小于4℃,相对误差在10%以内,因此可以认为所建立的数值模型能够较好地模拟滚刀振动切削破岩温度变化过程。基于此,下文利用所建立的数值模型进一步对滚刀振动破岩过程中温度场分布特征和各因素影响规律展开分析讨论。

3 滚刀振动破岩切削温度变化规律

由图7可以明显看到,滚刀振动破岩时最大切

削温度随着切削位移的增加呈现阶跃递增特征,为进一步揭示滚刀振动破岩时产热机制,仿真中设定滚刀切削速度为10 mm/s、激振频率为60 Hz、激振幅值为0.1 mm,得到滚刀切削温度随切削时间变化规律如图8所示。

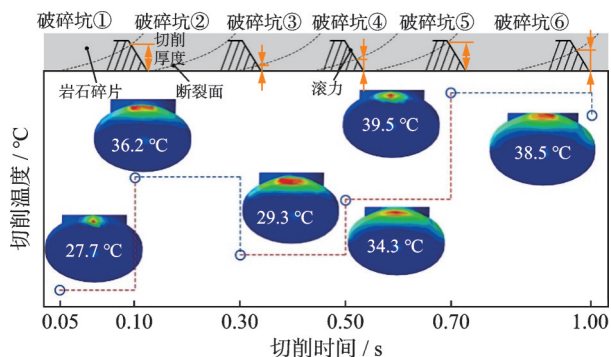


图8 滚刀切削温度随切削时间变化规律

Fig.8 Changing laws of cutting temperature of disk shape cutter with time

在滚刀和岩石初始接触阶段,由于贯入位移较小,切削热量集中区域范围较小,在设置仿真初始温度20℃基础上,滚刀最高温度为27.7℃,温升幅度为7℃。随着贯入深度的增加,一方面由于滚刀的弧形结构与岩石之间的接触范围增大,可视为热源的等效面积增加;另一方面,考虑到热传导作用,在0.1 s时可以看到滚刀的温度分布范围显著增大,且最高温度增加到36.2℃。滚刀振动切削破岩时,岩石具有典型的脆断特征,其破碎形貌呈阶跃状,滚刀振动切削岩石破碎形貌如图9所示。

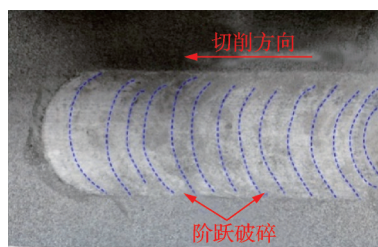


图9 滚刀振动切削岩石破碎形貌

Fig.9 Rock morphology of vibrational cutting by the disk shape cutter

在滚刀实际振动切削破岩时,滚刀刀圈与岩石并非均匀接触,切削热量在“刀-岩”接触位置集中并导致局部最高温度升高,这一实验结果与图7中滚刀切削温度随切削位移呈阶跃式升高的结果一致。由于岩石以阶跃形式破碎,且岩屑在切削方向上的断裂尺寸显著大于滚刀一个激振周期内的位移,因此滚刀和岩石之间处于接触切削和无接触或弱接触

交替出现的状态。当滚刀处于无接触或弱接触状态时,由于滚刀和岩石之间相互作用载荷较小,因此产生少量切削热,滚刀温升不明显。此外,考虑到滚刀自身热量扩散以及和空气之间热量交换,因此滚刀最大切削温度存在一定程度的降低。由图9可知,当切削时间为0.3 s时,滚刀最高切削温度降低至29.3℃,但可以看到温度云图范围有进一步扩大的趋势,这一结果也与上述分析相对应。随着切削时间增加,在0.3~1.0 s范围内,滚刀切削温度变化与上述分析规律一致,即总体呈阶跃上升趋势,在无接触或弱接触状态时最高切削温度略微下降,温度云图范围进一步扩散增大。

在掌握滚刀振动破岩切削温度变化规律基础上,结合图8中的滚刀温度分布云图,通过监测滚刀不同位置的网格单元温度,进一步揭示切削热在滚刀内部的传递扩散机制。考虑到滚刀为以切削方向为轴的对称结构,因此仅在一侧选择对象单元。此外,由于滚刀仅有半侧接触岩石,且切削温度集中分布在与岩石接触一侧,因此以滚刀1/4部分为主要研究区域。以切削方向为起点,沿滚刀圆周方向在90°范围内均匀选择4个单元,滚刀单元温度随切削时间变化规律如图10所示。

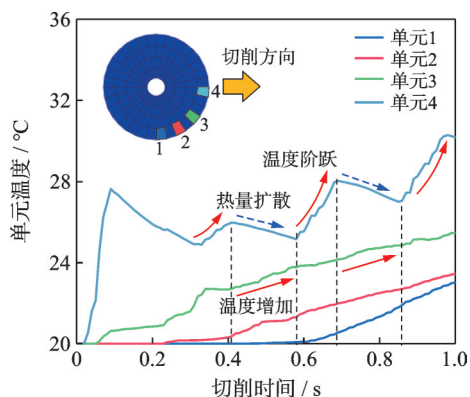


图10 滚刀单元温度随切削时间变化规律

Fig.10 Temperature of different elements varying with cutting time

滚刀振动切削岩石时,4号单元最先与岩石接触,因此其单元温度迅速上升;随着贯入深度逐渐增加,3号单元后续与岩石接触,其单元温度略微增加。由于滚刀振动破岩时岩石表现出脆性断裂特征,滚刀破碎岩石的贯入深度远远小于滚刀直径,因此1号和2号单元与岩石之间的相互作用状态为弱接触。此外,在滚刀初始切削阶段,1号和2号单元距离“刀-岩”接触位置较远。因此,从图10中可以看到,1号、2号单元的温度变化比3号、4号单元具有

显著滞后性,且温度相对较低。由图10中4个单元的温度随切削时间变化曲线,并结合图8中滚刀的温度场变化规律可知,靠近“刀-岩”接触位置的单元温升主要来源于滚刀振动切削岩石生成的切削热,而滚刀周向方向单元温度升高则主要是由滚刀内部的热传递引起。

与岩石主要接触的4号单元温度即为滚刀的最大切削温度,且其具有显著的阶跃变化特征。3号单元温度随切削时间的阶跃变化规律并不明显,而1号、2号单元温度随切削时间的变化规律未表现出阶跃特征。这一结果进一步验证了上述分析,即在滚刀振动破岩过程中,滚刀仅有小部分区域与岩石接触,切削热量集中导致温度升高,而滚刀圆周方向温度变化则主要是源于滚刀内部的热传导效应。

4 滚刀振动破岩切削温度因素分析

在滚刀振动破岩过程中,切削热量主要受破岩载荷和摩擦力影响,因此,影响滚刀破岩载荷的因素在一定程度上直接关系到滚刀的切削温度。由于滚刀振动破岩时温度的变化是切削产热和热传递二者共同作用的结果,因此“刀-岩”相互作用接触位置被视作为热源,而未接触部位温度的升高则是由滚刀内部存在的温度梯度所导致。鉴于所有仿真中边界条件和热力学参数的设置均一致,不同振动参数下滚刀破岩产热(即热源处的最高温度)和热传递导致的温度场分布均可反映滚刀振动切削破岩时的温度特性。

本研究以上述提到的3种不同岩石为切削对象,探究岩石强度对切削温度的影响规律,并考虑切削速度和振动频率这两个滚刀切削参数对切削温度的影响。

4.1 切削速度

在激振频率为60 Hz和激振幅值为0.1 mm的条件下,研究滚刀切削速度对切削温度的影响,切削速度的范围设定为11~19 mm/s,间隔为2 mm/s,共5种不同工况。不同切削速度下滚刀切削温度的时程曲线如图11所示。

由图可见,在滚刀和岩石初始接触阶段,滚刀切削温度和切削速度之间为正相关关系;由于岩石断裂对应的切削位移不受滚刀切削速度的影响,因此高切削速度工况下滚刀切削温度的增长率较大。此外,通过对比不同切削速度下的滚刀切削温度曲线变化规律可知:当切削速度较低时,滚刀切削温度随

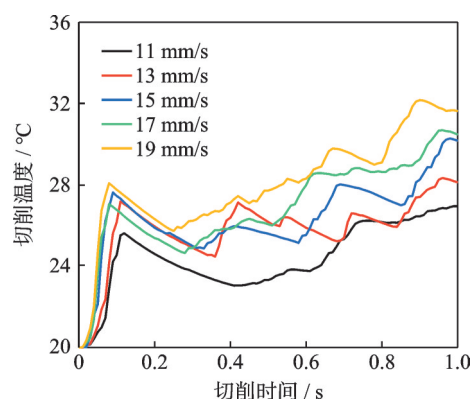


图11 不同切削速度下的滚刀切削温度变化曲线

Fig.11 Time history curves of cutting temperature of cutter at different cutting velocities

时间变化较为平稳;随着切削速度增加,滚刀切削温度曲线表现出上述分析的阶跃上升特征;当滚刀具有较高切削速度时(19 mm/s),滚刀切削温度表现出的阶跃特征下降,并呈现出相对平缓的增长趋势。出现这一结果的主要原因为:当切削速度较低时,滚刀内部的热传导作用对最大切削温度的影响相对明显;随着切削速度的增加,单位时间内产热量增加,切削温度短时间内快速增加,而在弱接触或无接触阶段,由于滚刀内部存在温度梯度,导致最大切削温度略微下降,表现出阶跃增加而后轻微下降的变化趋势;当滚刀处于较高的切削速度时,一方面切削温度在短时间内增加,另一方面滚刀处于弱接触或无接触阶段的时间缩短导致温度下降不明显,表现出切削温度随着时间变化平缓增加的趋势。

通过分析不同切削速度下的滚刀切削温度变化规律可知,在选定的5种切削速度工况下,滚刀处于较高和较低切削速度时,滚刀内部切削温度变化相对平稳,且当切削速度较高时,滚刀一直处于温度相对较高的状态;采用中等的切削速度时,滚刀内部温度升降变化相对显著,从热疲劳角度而言对滚刀寿命不利。

滚刀振动破岩时最高切削温度随切削速度的变化规律如图12所示。由图可知,最大切削温度和切削速度为正相关关系,采用线性函数和幂函数对最大切削温度的变化规律进行拟合。由拟合结果可知,线性函数和幂函数均能较好地反映滚刀最大切削温度和切削速度之间的关系,拟合函数的决定性系数 R^2 均超过0.95。然而,滚刀最大切削温度的升高会加速热传导过程,导致滚刀切削温度随切削速度的变化呈现显著非线性特征;同时,幂函数的拟合优度略高于线性方程,因此采用幂函数描述滚刀切削温度与切削速度之间的关系更为适宜。

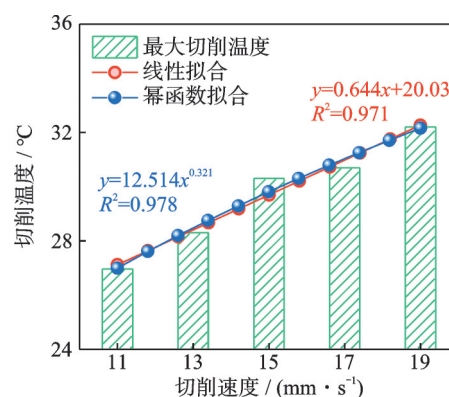


图12 滚刀振动切削最高温度随切削速度变化规律

Fig.12 Maximum cutting temperature of vibrational disk shape cutter changing with cutting velocities

4.2 激振频率

振动频率是滚刀振动破岩的重要参数,设定滚刀振幅为0.1 mm、切削速度为15 mm/s、激振频率范围为50~90 Hz,间隔为10 Hz,共5个工况。不同激振频率下滚刀切削温度变化曲线如图13所示。激振频率较高时,在滚刀和岩石初始接触阶段单位时间内切削温度增幅明显,各激振频率下滚刀切削温度的时程曲线变化规律差异不明显。随着切削过程的进行,滚刀最大切削温度差异逐渐显著,最大切削温度随激振频率变化的统计结果如图14所示。

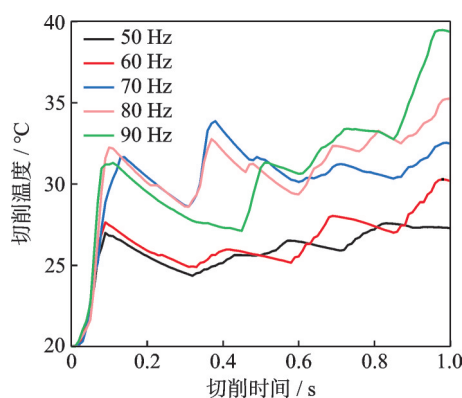


图13 不同激振频率下滚刀切削温度变化曲线

Fig.13 Time history curves of cutting temperature of cutter at different vibrating frequency

由图14可以看出,滚刀切削温度和激振频率之间呈现显著的正相关关系,采用线性函数对两者进行拟合分析,拟合函数的决定性系数 R^2 为0.983,表明激振频率和切削温度之间具有较强的线性关系。在相同切削时间内,90 Hz激振频率下的切削温度为50 Hz时的1.4倍。因此,在采用振动方式辅助碟形滚刀破岩时,不仅需重点考虑激振频率对滚刀破岩性能的影响,还需综合兼顾过高激振频率所引发的滚刀切削温度显著升高问题。

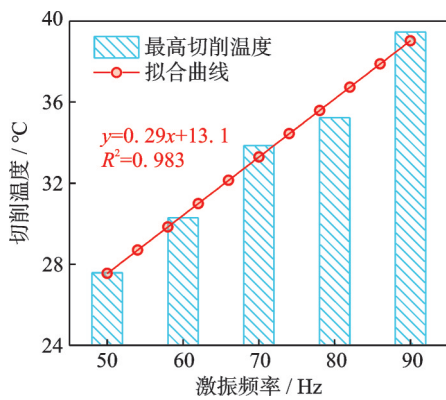


图 14 滚刀振动切削最高温度随激振频率变化规律
Fig.14 Maximum cutting temperature of vibrational disk shape cutter changing with vibrating frequency

4.3 岩石强度

岩石强度是影响机械刀具破岩载荷的重要因素之一,其直接关系到滚刀振动破岩时的切削温度。对表 2 中给出的 3 种岩石进行滚刀振动破岩测试,以探究岩石强度参数对滚刀切削温度的影响规律,揭示岩石类型对滚刀切削温度的影响机制。

不同岩石强度下的滚刀切削温度变化曲线如图 15 所示,根据表 2 给出的 3 种岩石强度参数,砂岩、大理岩、花岗岩的强度依次增大。从图 15 中可以看出,花岗岩对应的滚刀切削温度最高,其次是大理岩和砂岩。这主要是由于岩石强度与滚刀破岩载荷成正比^[17],滚刀破碎高强度岩石时产生的切削热量较多。在切削时间均为 1 s 的工况下,花岗岩和大理岩对应的滚刀切削温度分别为砂岩的 2.5 倍和 2 倍。与切削速度和激振频率相比,岩石强度对滚刀切削温度的影响更为显著。

对比 3 种岩石对应下的滚刀切削温度时程曲线可知,滚刀破碎砂岩时切削温度随切削时间变化相

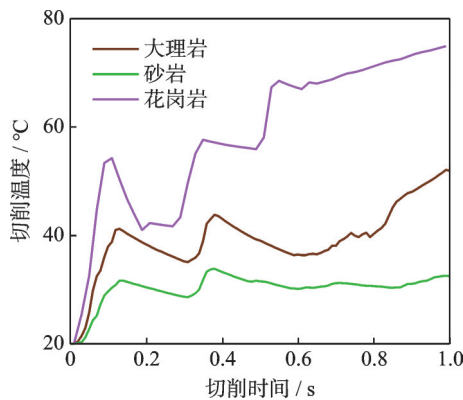


图 15 不同岩石强度下的滚刀切削温度变化曲线
Fig.15 Time history curves of cutting temperature of cutter at different conditions of rock types

对平稳,滚刀的切削温度曲线无明显阶跃上升特征;随着岩石强度增大,滚刀破碎大理岩时,其切削温度波动程度明显大于砂岩;当滚刀破碎高强度花岗岩时,滚刀的切削温度曲线表现出明显阶跃上升特征。出现这一差异的主要原因为:砂岩强度较低,其脆断特征降低而形成的岩渣粒度较小,滚刀在破碎砂岩时处于无接触或弱接触状态的时间较短,因而切削温度曲线变化相对平稳;随着岩石强度的增加,岩石脆性断裂特性逐渐增强,破碎粒度相较于砂岩显著增大,随着岩石强度的增加,滚刀切削温度阶跃增大特性逐渐显著。

5 结 论

1) 滚刀振动切削破岩时,岩石具有阶跃破坏特征,滚刀与岩石之间的接触具有非连续性,两者接触位置热量集中;破碎坑的存在导致“刀-岩”之间处于无接触或弱接触状态,使得滚刀内部存在明显的温度梯度,热量向内部扩散,最大切削温度略微降低,因此滚刀切削温度随切削位移增加表现为阶跃式上升特征。

2) 在较高和较低切削速度工况下,滚刀切削温度变化相对平稳,而处于中等切削速度时,滚刀切削温度具有明显的阶跃变化特征;切削速度和切削温度之间存在正相关关系,且相比于线性函数,幂函数更适合描述两者关系。

3) 激振频率和切削温度之间为正相关线性关系,90 Hz 激振频率下的滚刀最大切削温度为 50 Hz 时的 1.4 倍。因此,在选用合适的激振参数时,应当考虑高激振频率对滚刀温度的不利影响。

4) 由于不同强度岩石断裂模式存在差异,滚刀振动切削破碎低强度岩石时,切削温度随切削时间增加变化相对平稳;在高强度岩石工况下,切削温度阶跃增大特征显著;切削温度和岩石强度之间存在正相关关系,且与切削速度和激振频率相比,岩石强度对切削温度的影响更为显著。

参 考 文 献

- [1] RAMEZANZADEH A, HOOD M. A state-of-the-art review of mechanical rock excavation technologies[J]. International Journal of Mining & Environmental Issues, 2010, 1(1): 29-39.
- [2] 江红祥,刘送永,蔡芝源. 滚刀振动切削岩石动力学特性[J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 152-165.
JIANG Hongxiang, LIU Songyong, CAI Zhiyuan. Dy-

- namic characteristic of rock cutting by vibrational disc cutter[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(7): 152-165. (in Chinese)
- [3] KOVALYSHEN Y. Analytical model of oscillatory disc cutting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 77:378-383.
- [4] DEHKHODA S, DETOURNAY E. Mechanics of actuated disc cutting[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017, 50: 465-483.
- [5] XU R, DEHKHODA S, HAGAN P. Evaluation of cutting fragments in relation to force dynamics in actuated disc cutting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 146: 104850.
- [6] XU R, SELLERS E, FATHI-SALMI E. Rock recognition and identification for selective mechanical mining: a self-adaptive artificial neural network approach [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82: 267.
- [7] SAHINOGLU U, OZER U. The prediction of cutter wear from temperature measurements on TBM discs and cutting face[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(5): 207.
- [8] ZHANG X, LI X, XU W P, et al. Experimental investigation of the failure of conical picks under thermal and abrasive effects[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 156: 107737.
- [9] FU J, ZENG G, ZHANG H, et al. Experimental investigation on wear behaviors of TBM disc cutter ring with different cooling methods[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 134: 106076.
- [10] FU J, YIN X, LIU F, et al. Investigation on thermal behavior of TBM disc cutter under different cooling conditions[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 49: 103392.
- [11] FAN Q, ZHANG Q, LIU G, et al. An experimental study on wearing of conical picks interacting with rock [J]. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2019, 43(4): 544-550.
- [12] LIU S F, LU S F, WAN Z J, et al. Development and application of a new temperature-measuring pick[J]. *Measurement*, 2019, 149: 107034.
- [13] XIA Y M, YIN X W, FU J, et al. Study on the distribution and variation of temperature field in the rock breaking process of TBM disc cutter[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 186: 108086.
- [14] DENG L C, LI X Z, CHEN Y W, et al. Investigations on cutting force and temperature field of pick cutter based on single factor and orthogonal test methods[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(1): 619-645.
- [15] 郭润兰, 尉卫卫, 王广书, 等. 基于深度SSDAE网络的刀具磨损状态识别[J]. *振动、测试与诊断*, 2024, 44(2): 305-312.
- GUO Runlan, YU Weiwei, WANG Guangshu, et al. Study on global dynamic strain tip vibration mapping method of turbine blade[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2024, 44(2): 305-312. (in Chinese)
- [16] ADAMOWICZ A, GRZES P. Analysis of disc brake temperature distribution during single braking under non-axisymmetric load[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31: 1003-1012.
- [17] 江红祥, 张晓迪, 高魁东, 等. 周向超前割缝辅助碟形滚刀楔裂硬岩性能[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(3): 1689-1703.
- JIANG Hongxiang, ZHANG Xiaodi, GAO Kuidong, et al. Rock breaking performance of disc cutter assisted by circumferential pre-slotting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(3): 1689-1703. (in Chinese)



第一作者简介:江红祥,男,1987年4月生,博士、副教授、博士生导师。主要研究方向为高压水射流技术和机械冲击动力学。曾发表《滚刀振动切削岩石动力学特性》(《机械工程学报》2022年第58卷第7期)等论文。
E-mail:jianghongxiang@cumt.edu.cn