

基于 ABAQUS 的 PDC 钻头切削齿破岩 仿真及热分析

张丽秀,申 强,张 珂,魏春雨

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究聚晶金刚石(PDC)钻头切削齿破岩过程中的温升及变形情况,确定在不同切削参数下 PDC 钻头单齿破岩时温升和变形的变化规律. 方法 利用非线性有限元仿真软件,建立了二维 PDC 钻头切削齿-岩石动态仿真模型,通过改变钻头切削齿破岩时的切削参数,得到了不同参数条件下切削齿温度和变形的变化规律,对切削齿破岩过程中的温升及热变形进行分析. 结果 切削温度在初始阶段上升较快,0.02 s 左右趋于平稳,同时切削深度对温度的影响最大;温度的升高以及切削力的变大,会使切削齿的变形增大. 结论 在 PDC 钻头单齿破岩的过程中,PDC 切削齿的温度变化与其切削深度、切削速度以及齿前角密切相关. 切削深度对其温度的影响较为明显. 与所受的切削力相比温度对切削齿的变形影响较为明显.

关键词 PDC 切削齿;破岩;温升;变形;有限元

中图分类号 TE921

文献标志码 A

Broken Rock Simulation and Thermal Analysis of PDC Drill Cutting Edge Based on ABAQUS

ZHANG Lixiu, SHEN Qiang, ZHANG Ke, WEI Chunyu

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose is to study the temperature rise and deformation during the rock cutting of the polycrystalline diamond Compact bit (PDC), and to determine the variation of temperature rise and deformation of the PDC bit with single tooth breaking under different cutting parameters. A two-dimensional PDC bit cutting teeth-rock dynamic simulation model was established based on nonlinear finite element simulation software. The variation of temperature and deformation of the cutting teeth under different parameters was obtained by changing the cutting parameters of the bit cutting teeth, and the temperature rise and thermal deformation were analyzed during cutting rock cutting process. As a result, the cutting temperature rises quickly at the initial stage and tends to be stable at about 0.02 s. At the same time, the depth of cut has the greatest effect on the tempera-

收稿日期:2017-08-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51375317);辽宁省科技创新重大项目专项计划(201506003);住房和城乡建设部科学技术项目(2015-K3-009)

作者简介:张丽秀(1970—),女,教授,博士研究生导师,主要从事机电一体化等方面研究.

ture. The deformation of cutting teeth is increased with the increase of temperature and the cutting force. The temperature change of PDC cutting teeth is closely related to its cutting depth, cutting speed and rake angle in the process of single tooth rock breaking with PDC bits. The depth of cut has a significant effect on its temperature. And the temperature has more significant effect on the deformation of the cutting teeth than that of the cutting force.

Key words: PDC cutting tooth; rock-breaking; temperature rise; deformation; finite element

煤层气钻机在勘探钻井时,聚晶金刚石(PDC)钻头切削齿在破岩过程中,会产生明显的温升变化,如果钻头的温度过高,其产生的热应力不但会超过材料的最大许用强度而造成钻头的失效,影响其使用寿命,同时温度的升高必然也会导致钻头切削齿的热变形从而影响其切削效率^[1-2]. MAMALIS A G 等^[3]研究了在高速切削过程中塑性形变消耗的功率与热量的转化关系. VORONTSOV A L 等^[4]研究了刀具前角对切削温度的影响关系. CAO L 等^[5]对切削过程进行了三维顺序耦合热应力分析,并将仿真所得结果与其所做的实验结果进行对比分析,对有限元方法的可行性进行了验证. 杨晓峰等^[6]深入研究了钻头破岩的传热过程,从而建立了钻头切削破岩过程中温度场的微分方程组以及温度场的边界条件. 阳启华^[7]等人利用有限元分析软件,对切削过程中刀具的温度场进行了模拟分析,得出了刀具前角对切削温度的影响规律. 龙巾帼等^[8]模拟了热-结构耦合场下 PDC 切削齿破岩过程,通过对比理论计算结果,确立了其方法的可行性. 可见,大多研究是只对切削过程中的温度变化情况做了分析,并没有考虑到温升对切削齿变形的影响情况及其 PDC 钻头切削齿破岩很强非线性的特征^[9-10]. 基于此,笔者首先利用有限元方法对 PDC 钻头切削齿切削岩石过程中温升变化进行研究,建立了二维切削齿-岩石切削仿真模型,并采用岩石弹塑性 D-P 模型^[11-14]以及材料失效准则来模拟钻头切削齿动态破岩过程中的切屑与岩石的分离,模拟了钻头切削齿动态破岩过程,然后通过仿真所得的结果对切削齿的变形影响因素进

行分析,确定在不同切削参数下 PDC 钻头单齿破岩时温升和变形的变化规律.

1 PDC 钻头破岩热理论分析

1.1 破岩过程生热机理

煤层气钻机工作时,PDC 钻头切削岩石的过程中,切削力所做的功很大一部分都被转化为热能,即切削热. 由于瞬时切削所产生大量的热量在短时间内无法快速扩散,导致了在切削区域的温度大幅度升高. 温度的急剧上升,会降低切削区域的岩石硬度和强度,有利于切削的进行,但是切削齿温度的升高,不仅加快了钻头切削齿的热磨损程度还会使整个钻头体产生相应的热变形,造成切削齿 PCD 表面层的损伤和破坏,从而影响其钻进效率,如果长时间处于高温状态就会使 PDC 钻头失效^[15-17]. 钻头切削齿在破岩的过程中产生的热量主要来自于两个方面:一是切削岩石时使岩石发生弹性变形和塑性变形而产生的热量;二是在破岩时切削齿与岩石基体以及产生的岩屑相接触时,由于滑动摩擦而产生的大量摩擦热量.

假设钻头进给时消耗的能量忽略不计,钻头切削过程中所产生的热量为

$$Q = F_c v_f. \quad (1)$$

式中: Q 为切削热; F_c 为主切削力; v_f 为切削速度.

1.2 切削过程热传导分析

钻头的破岩过程是一个极其复杂的热传导过程,无法利用公式准确地计算出钻头工作时的实际温度,同时摩擦热是钻头温升的主要来源. 由于 PDC 复合片的导热率要远远大于岩石的导热率,在破岩时岩石和岩屑的

温度相比切削齿的温度会较高.在破岩过程中岩石与切削齿是面接触,所以岩屑表面层温度相对较高,而岩体则由于导热率偏低,沿岩石深度方向温度函数降低最快.

1.2.1 导热微分方程

想要准确描述切削齿的温度场的变化情况,就要全面考虑切削过程中的岩石、切屑以及周围环境等复杂的影响因素,通过傅里叶导热定律和能量守恒定律推导出导热微分方程.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q=\rho c_T\frac{\partial T}{\partial t}.$$

(2)

式中: k_x 、 k_y 、 k_z 分别为沿着各方向的热传导系数; $Q(x,y,z,t)$ 为内部的热源强度; ρ 为材料密度; c_T 为比热容.

1.2.2 温度场边界条件

在切削区接触面上通过摩擦所产生的热流密度 $\overline{q_f}(t)$ 与温度 T 的关系可由傅里叶定律推导出:

$$k_x\frac{\partial T}{\partial x}n_x+k_y\frac{\partial T}{\partial y}n_y+k_z\frac{\partial T}{\partial z}n_z=\overline{q_f}(t).$$

(3)

假设在整个切削过程中,摩擦热全部是由摩擦力所做的功转化而来,会有:

$$\overline{q_f}(t)=\mu Fv_2.$$

(4)

式中: n_x 、 n_y 、 n_z 为边界处外法线的方向余弦;

$\overline{q_f}(t)$ 为边界上的热流密度; μ 为摩擦系数; F 为接触面正法向力; v_2 为滑动摩擦速度.

2 PDC 切削齿破岩有限元模型的建立

设置岩石基体长度为 120 mm,高度为 30 mm,PDC 切削齿直径为 13.44 mm,厚度为 5 mm,其中 PDC 复合片 1 mm,碳化钨基体 4 mm.装配时将切削齿的齿前角设置为 10°,切削深度为 2 mm.装配后的二维模型如图 1 所示.

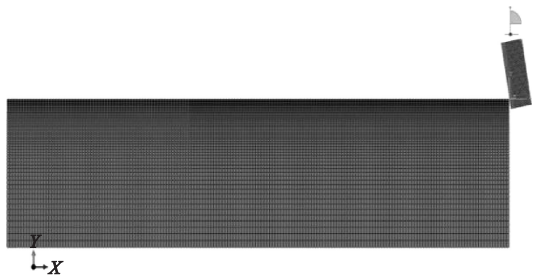


图1 PDC 切削齿破岩有限元几何模型

Fig. 1 Finite element geometric model of PDC cutting tooth breaking rock

考虑到存在于煤层附近的基本都是沉积岩,同时砂岩在沉积岩中是非常普遍的,并且在煤层附近分布很广,因此在建模时岩石的基本参数选择砂岩作为其主要参数,建模时所用到的主要材料参数如表 1 所示.

表1 有限元分析物理热力学性能参数

Table 1 Finite element analysis of physical thermodynamic performance parameters

材料	弹性模量/ GPa	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	热导率/ ($\text{J}\cdot(\text{ms}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$)	热膨胀系数/ $10^6\text{ }^{\circ}\text{C}$	泊松比
PDC 层	890	3 550	552	800	2.7	0.07
硬质合金	582	15 200	110	260	5.4	0.22
岩石	39	2 630	3.5	840	6.0	0.25

切削齿和岩石模型都采用四边形单元进行划分,单元类型选择四节点热耦合平面应变四边形减缩积分单元:CPE4RT.在载荷模块中设置边界条件,创建初始的边界条件使

岩石的左下底面完全固定,在创建分析步中的边界条件为沿着 X 轴负方向切削速度为 2 m/s,创建预定义初始温度为 20 °C,根据建模时岩石的长度以及切削速度设置分析步的

时间为 0.05 s. 笔者在模拟切削齿动态切削岩石的过程中,运用了材料失效准则(剪切损伤)与失效单元删除相结合的方法,模拟出了切削过程中的切屑与岩石的分离效果.

3 仿真结果分析

3.1 切削齿温度分布分析

图 2 为建模后的某一时刻的动态破岩过程已经成功地模拟了切削齿切削岩石时的切屑与岩石的分离,由于切削齿的网格划分较

密,为观察切削齿的温度变化情况,在软件中创建显示组单独显示切削齿并将其进行局部放大.

图 3 为设置切削齿为显示组之后切削齿在切削过程中的温度变化及分布情况.可以发现最高温度出现在切削齿与切屑的接触区,这是由于在破岩过程中岩石受到弹塑性变形从而产生了大量的热能,使得在切削齿前齿面的接触区出现很高的温度.同时还可以看到切削齿的一些部位仍然处于初始温度,这是因为在切削岩石的过程中,接触区域摩擦表面的滑动速度很快,接触时间较短,由于摩擦瞬时产生的摩擦热来不及向内部扩散.所以,在切削过程中所产生的摩擦热量绝大部分集中在切削齿前齿面处的表面较薄的区间,使得切削齿外表面的温度很高,这会使岩石表层软化并降低岩石的强度、硬度,从而更有利于破岩的进行.

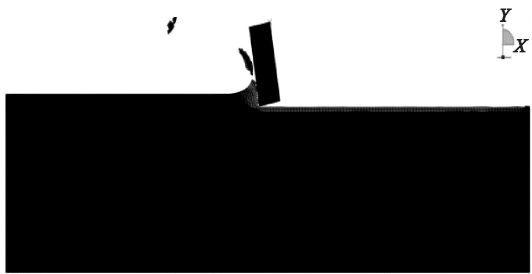


图 2 切削齿动态切削岩石过程

Fig. 2 Dynamic cutting process of the cutting tooth

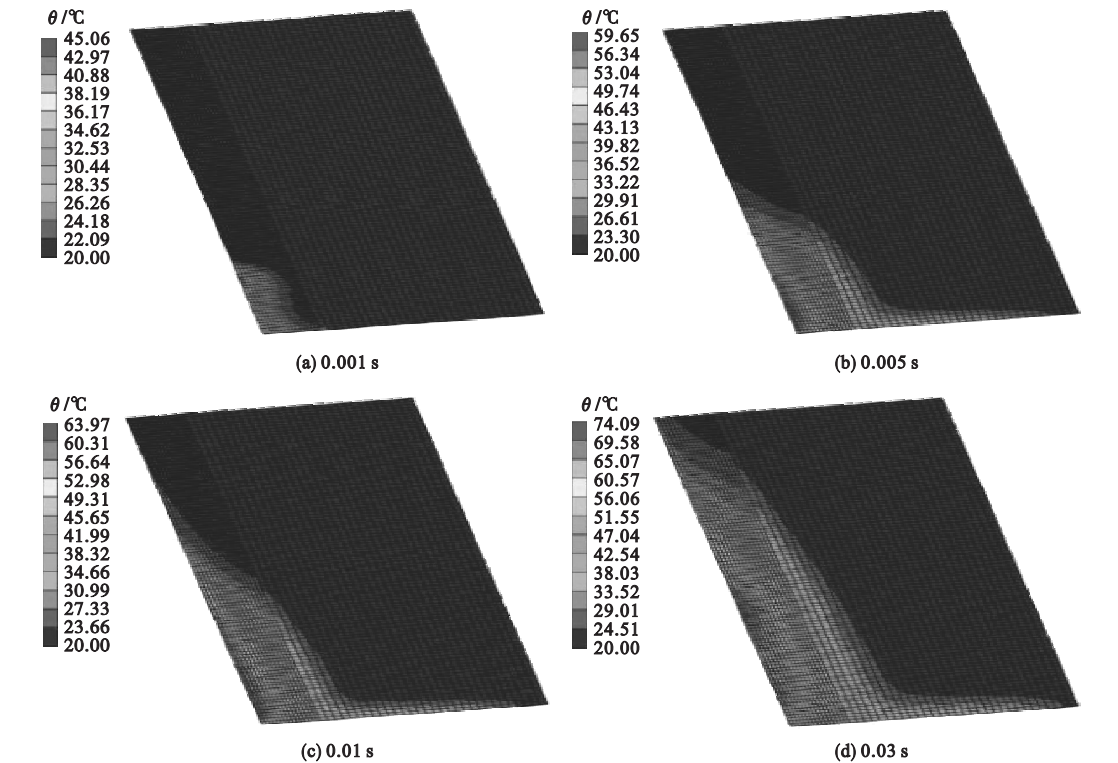


图 3 切削齿随时间变化的温度云图

Fig. 3 The temperature of the cutting tooth varies with time

图 4 为在切削深度为 1 mm、切削速度为 2 m/s、齿前角为 10° 的情况下,选取切削齿前齿面上某一节点的温度变化情况.可以看出切削齿前齿面的温度在切削的初始阶段上升很快,大约在 0.01 s 内就完成了整个温度的上升阶段.在随后的时间里,温度处于较为稳定的状态,这是因为受到切削齿前齿面与切屑间发生的强烈的摩擦热及切屑变形热的作用,而且切削温度是一个不断积累的过程,在切削区域塑性变形和摩擦产生的热都在不断的积累导致温度会随着时间的增加而上升,最后达到相对热平衡状态.热平衡状态下温度曲线呈现出在一定的范围内上下波动的状态,这也比较符合塑脆性材料在达到相对稳定状态时,其稳定值不会一直处于平稳不变的状态,而是会在一定的幅度内上下波动的基本特征.

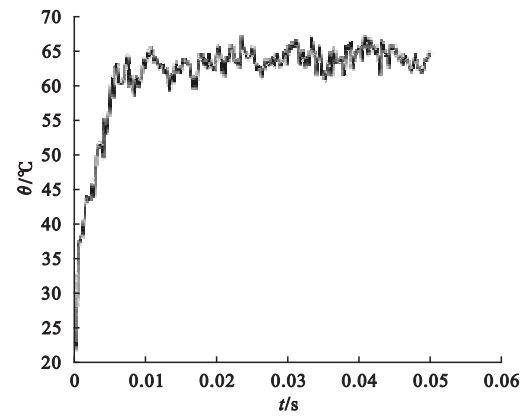


图 4 切削齿前齿面一节点温度时间曲线

Fig. 4 The time curve for front tooth surface temperature of cutting tooth

3.2 切削参数对切削温度的影响分析

3.2.1 切削深度对切削齿温度的影响分析

图 5 为切削速度为 1.5 m/s,齿前角为 10° 时的不同切削深度下对应的温度曲线.可以看出,随着切削深度的增加切削齿的温度也在逐渐升高.这是由于在切削的初始阶段,切削深度较小时,切削过程主要产生的是挤压破碎碎屑,这时主要是热传导过程导致切削齿温度的上升,温度的最大值变化不太明

显;而当切削深度增大时,岩石的剪切面增大,从而增大了岩石的剪切变形,相应随着剪切变形所做的功也增大,导致了摩擦产生的热量也在增加,因此在整个切削过程中,切削温度会逐渐上升.在实际工程应用中,由于地层周围复杂的地理环境和破岩工作状况的波动会对 PDC 切削齿造成一定的冲击,过多的进给量(切削深度)会使钻头切削齿承受过高的冲击载荷,从而对 PDC 切削齿造成损坏.因此,在钻机实际钻井工作中需要控制在合理的进给量范围内来保证钻机钻进过程的顺利进行,而 2 mm 处于比较适中的深度,更具有代表性,因此选用 2 mm 作为进一步研究切削速度和齿前角对温度的影响的切削深度.

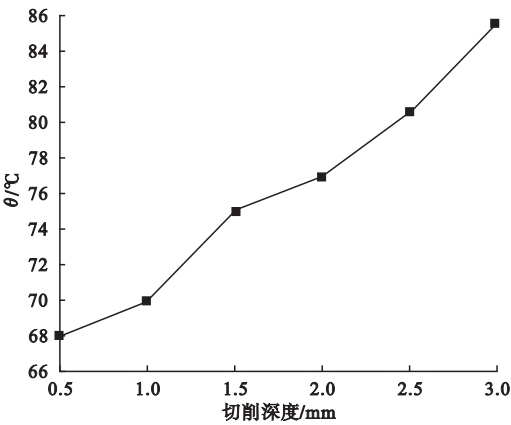


图 5 温度随切削深度的变化

Fig. 5 The temperature varies with the depth of the cutting

3.2.2 切削速度对切削齿温度的影响

图 6 为在切削深度为 2 mm,齿前角为 10° 时,不同切削速度下的温度变化图.从图 6(a) 可看出,在切削初始阶段,切削齿温度上升很快,而后随着切削过程的进行,温度变化波动趋于平缓,最后达到了一个相对稳定状态.不同的切削速度进入稳态的时间也不同,切削速度越大,进入稳态的时间就越短,达到稳定状态时的温度值也就越高.随着切削速度的增大,达到热平衡的时间越短.经过分析得出,在钻头切削岩石的过程中,随着切

削速度加快的同时,切削所产生的岩屑速率也在逐渐增加,这就导致切削产生的热量还没来得及及传导到切削齿就被岩屑带走了,因此被岩屑带走的这部分热量也在增加,所以随着切削速度的增加温度上升的速率在逐渐变缓.由图 6(b)所示可得,在相同的切削深度和齿前角的条件下,随着切削速度的增加,切削齿的平均温度也在逐渐升高.

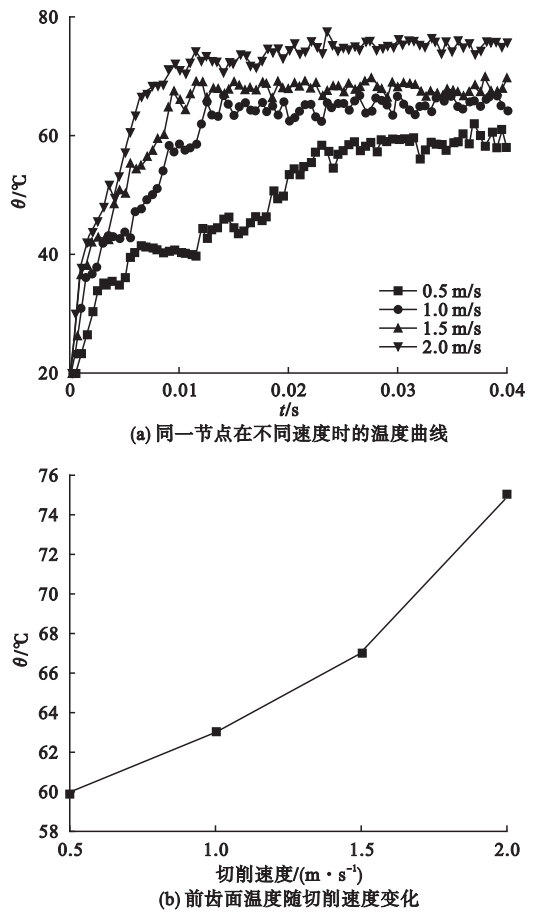


图 6 温度随切削速度的变化

Fig. 6 The temperature varies with the cutting speed

3.2.3 齿前角对温度的影响分析

图 7 为在切削深度为 2 mm,切削速度为 2 m/s 时,达到热平衡时的齿前角在 0°,5°,10°,15°,20°时切削齿的温度 - 齿前角关系图.从图中可以看出当齿前角为 0°和 5°时,切削齿的温度较高并且当齿前角为 5°时温度达到最大,当切削角从 10°到 20°时,温度

逐渐降低. PDC 钻头刀翼上的切削齿的齿前角都是负值^[18],因为负齿前角可以提高钻头的破岩效率.但是负的齿前角会加大切削齿对岩屑的挤压变形,产生排屑较困难的情况,增加了岩屑与切削齿前齿面的接触面积和接触时间,使摩擦加剧,摩擦热量也会增加.在实际工程中切削深度一样的情况下,需要找出合适的齿前角角度,过大或过小的齿前角都有可能导致钻头扭矩和钻压增大,切削齿就越容易造成损伤,虽然根据仿真结果显示齿前角在 20°时的温度最低,但是综合考虑钻头所受的扭矩和钻压以及钻头工作时的实际齿前角角度,最佳齿前角为 10°~15°.

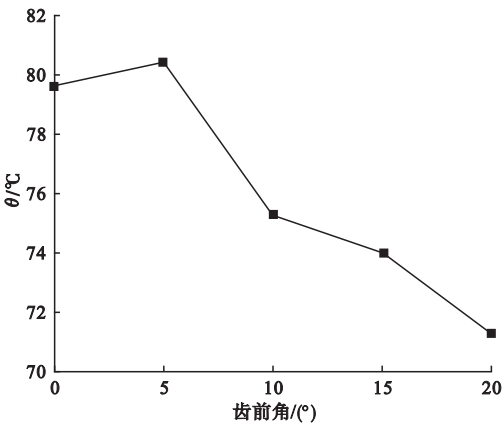


图 7 温度随齿前角的变化

Fig. 7 The change of temperature with the tooth front angle

3.3 切削齿的变形分析

3.3.1 温度对切削齿的变形影响

切削齿切削岩石的过程中,切削齿的温度最高可上升至将近 100 °C 左右,但是在钻机实际工作过程中受到复杂的地理环境以及外界环境的影响,钻头的温度一般都会高于此温度.因此,在仿真过程中设置对切削齿的基本载荷温度为 100 °C,切削齿的最大变形量 u 在 0.036 14 μm .图 8 为在切削深度为 1 mm、切削速度为 2 m/s、齿前角为 10°的条件下温度和受力对切削齿的变形情况.在 300 °C 时,最大变形量为 0.108 4 μm .结果显示需要把变形缩放系数设置为一致.可以看

出随着切削温度的升高切削齿的变形也在不断的增大。

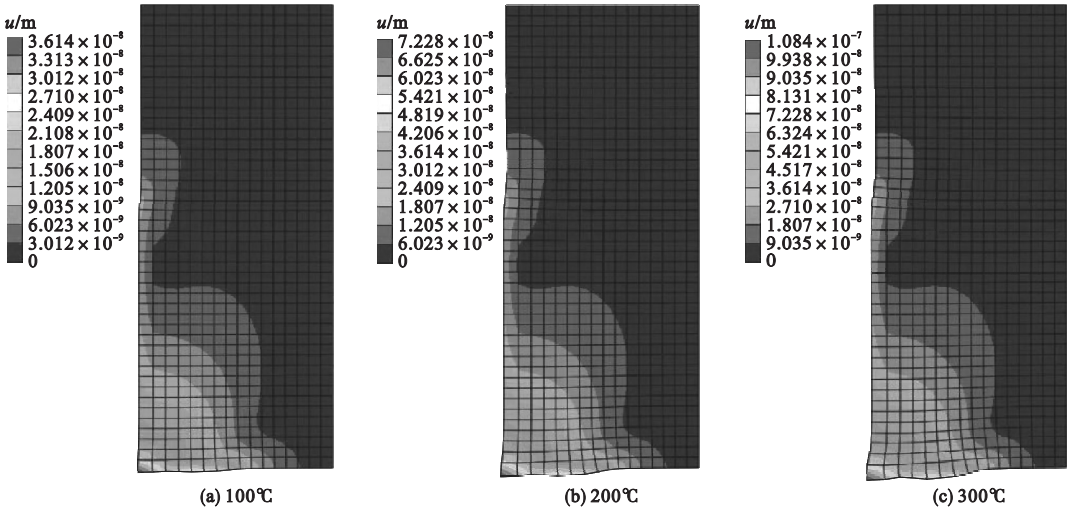


图8 温升引起的切削齿的变形图

Fig. 8 The deformation of the cutting tooth caused by the temperature rise

3.3.2 切削力对切削齿变形的影响

由于目前的切削力的计算只针对于刀具切削金属条件下,还没有切削岩石这方面的切削力的计算式. 根据文献[19-20]的实验数据得出主切削力为200~900 N,图9为在

切削深度为1 mm、切削速度为2 m/s、齿前角为10°的条件下温度和受力对切削齿的变形情况. 可以看出随着切削力的增大,变形也在不断增大,并且产生的应变范围相对较广.

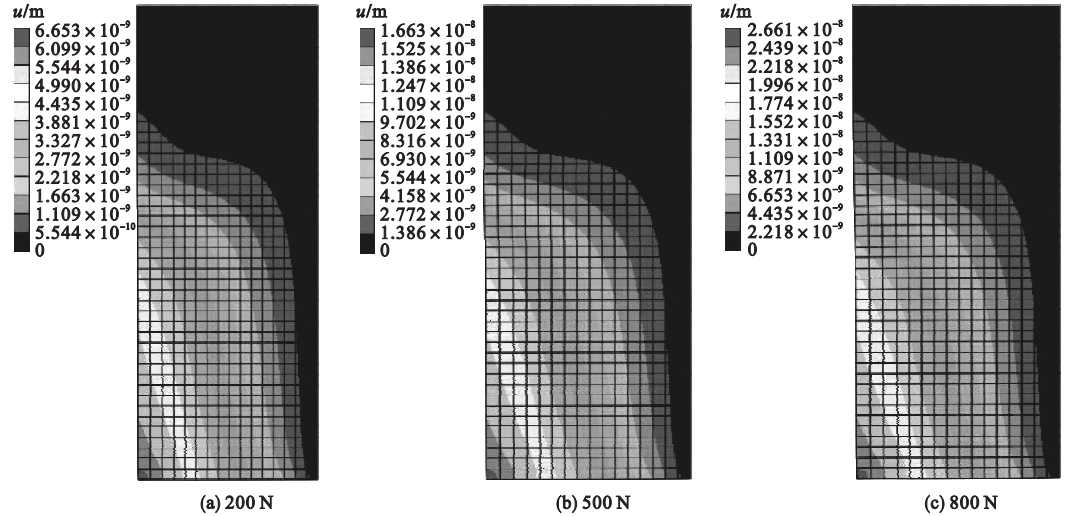


图9 受力引起的切削齿的变形图

Fig. 9 The deformation of the cutting tooth caused by force

3.3.3 温度和切削力对切削齿的变型影响

将其所受的载荷温度及切削力同时加载到切削齿上,进行有限元仿真. 图10为在切削深度为1 mm、切削速度为2 m/s、齿前角为10°的条件下温度和受力对切削齿的变形

情况.

从仿真结果可以看出,温度对切削齿变形的影响要明显大于切削力对切削齿变形的影响. 因此,在只针对于切削齿变形的影响因素中,要优先考虑温度对其所带来的影响程度.

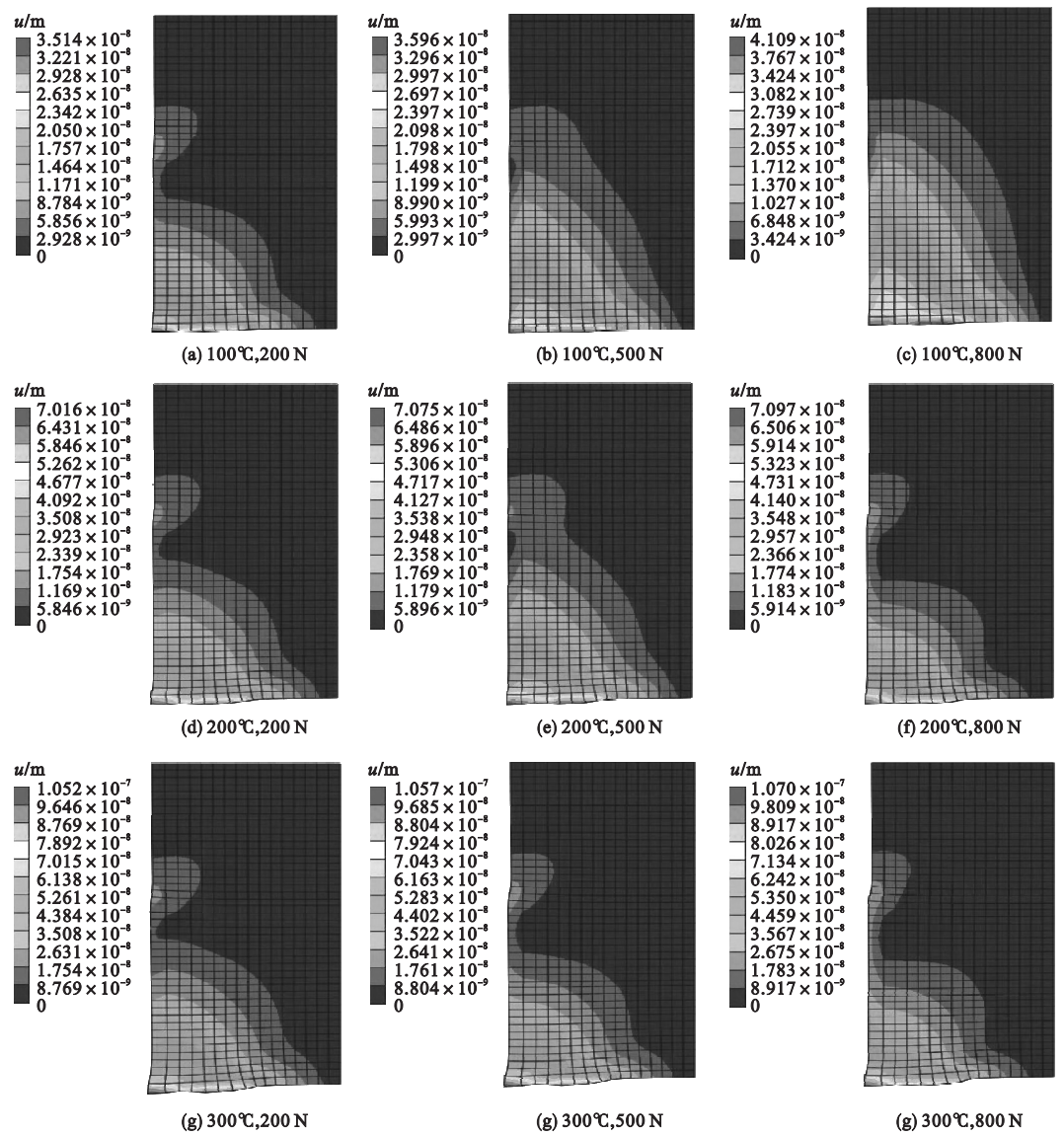


图 10 热力耦合引起的切削齿的变形

Fig. 10 The deformation of the cutting tooth caused by thermo-mechanical coupling

4 结 论

(1)根据切削温升-时间变化曲线可得出破岩过程中切削齿上的温度分布情况,在切削的初始阶段切削齿的温度上升很快,在0.02 s左右温度上升速度趋于平缓,最终达到热平衡状态。

(2)与切削速度、齿前角对切削温度的影响相比,切削深度对切削齿温度影响更大,在切削深度为3 mm时最高温度可达90℃左右。

(3)切削齿的变形随着温度的升高以及切削力的增大而增大,在300℃时最大变形为0.108 4 μm,而在800 N的切削力时的变形为0.026 6 μm,由此可得温度对切削齿的变形影响更为明显。

参考文献

[1] BESTE U, JACOBSON S. A new view of the deterioration and wear of WC/Co cemented carbide rock drill buttons[J]. Wear, 2008, 264 (11): 1129-1141.
[2] 王红波,刘娇鹏,鲁鹏飞,等. PDC 钻头发展与应用概况[J]. 金刚石与磨料磨具工程,

- 2011,31(4):74-78.
(WANG Hongbo, LIU Jiaopeng, LU Pengfei, et al. General situations of development and application of PDC bits[J]. Diamond & abrasives engineering, 2011,31(4):74-78.)
- [3] MAMALIS A G, HORVATH M, BRANIS A S, et al. Finite element simulation of chip formation in orthogonal metal cutting[J]. Journal of materials processing tech, 2009, 110(1):19-27.
- [4] VORONTSOV A L, SULTAN-ZADE N M, ALBAGACHIEV A Y, et al. Development of a new theory of thermal cutting processes 3. Influence of cutter's front angle on the cutting temperature and influence of preheating of the blank on the cutting force[J]. Russian engineering research, 2010,30(3):274-275.
- [5] CAO L, SHEN X J, LI R Y. Three-dimensional thermal analysis of spherical plain bearings with self-lubricating fabric liner[J]. Advanced materials research, 2010,97/101:3366-3370.
- [6] 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(natural science edition), 2011,42(10):3164-3169.)
- [7] 阳启华, 杜茂华, 蒋志涛. 基于 ABAQUS 的金属切削过程中刀具温度场模拟研究[J]. 工具技术, 2008,42(11):31-33.
(YANG Qihua, DU Maohua, JIANG Zhitao. Temperature field simulation of cutting tool in metal cutting process on ABAQUS[J]. Tool technology, 2008,42(11):31-33.)
- [8] 龙巾帼. PDC 钻头齿破岩热-结构耦合有限元仿真分析[D]. 成都:西南石油大学, 2012.
(LONG Jinguo. PDC drill bit tooth-rock thermal-structural coupling finite element simulation analysis[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.)
- [9] 路德春, 杜修力. 岩石材料的非线性强度与破坏准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12):2394-2408.
(LU Dechun, DU Xiuli. Research on nonlinear strength and failure criterion of rock materials[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013,32(12):2394-2408.)
- [10] STERPI D, GIODA G. Visco-plastic behavior around advancing tunnels in squeezing rock[J]. Rock mechanics & rock engineering, 2009,42(2):319-339.
- [11] ALEJANO L R, BOBET A. Drucker-prager criterion[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2012,45(6):995-999.
- [12] QI Y, JIANG Q, WANG Z, et al. 3D creep constitutive equation of modified nishihara model and its parameters identification[J]. Chinese journal of rock mechanics & engineering, 2012,31(2):347-355.
- [13] 丁祥, 张广清, 王芝银. 关联 Drucker - Prager 条件下等效塑性应变系数[J]. 应用力学学报, 2017,34(1):1-7.
(DING Xiang, ZHANG Guangqing, WANG Zhiyin. Coefficient of effect plastic strain based on associated flow of Drucker-Prager criterion[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2017,34(1):1-7.)
- [14] 袁小平, 刘红岩, 王志乔. 基于 Drucker - Prager 准则的岩石弹塑性损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2012,33(4):1103-1108.
(YUAN Xiaoping, LIU Hongyan, WANG Zhiqiao. Study of elasticplastic damage constitutive model of rocks based on Drucker-Prager criterion[J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(4):1103-1108.)
- [15] 张富晓. PDC 钻头切削齿失效分析与耐磨抗冲击性能试验研究[D]. 成都:西南石油大学, 2014.
(ZHANG Fuxiao. The failure analysis of PDC drill bit and the experimental study of its wear and impact resistance[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.)
- [16] ZEREN M, KARAGOZ S. Sintering of polycrystalline diamond cut-ting tools[J]. Materials & design, 2007,28(3):1055-1058.
- [17] 吴金炎, 王庆明. 基于热力耦合模型的金屬切削过程有限元分析[J]. 机械, 2009,36(2):18-21.
(WU Jinyan, WANG Qingming. Finite element analysis of metal orthogonal cutting process based on coupied thermo-mechanical model[J]. Machinery, 2009,36(2):18-21.)
- [18] 邹德永, 曹继飞, 袁军, 等. 硬地层 PDC 钻头切削齿尺寸及后倾角优化设计[J]. 石油钻探技术, 2011,39(6):91-94.
(ZOU Deyong, CAO Jifei, YUAN Jun, et al. Optimization design of the cutter size and back rake for PDC bit in hard formation[J]. Petroleum drilling techniquis, 2011,39(6):91-94.)
- [19] 张明, 王菲, 杨强. 基于三轴压缩试验的岩石统计损伤本构模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11):1965-1971.
(ZHANG Ming, WANG Fei, YANG Qiang. Statistical damage constitutive model for rocks based on triaxial compression test[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2013, 35(11):1965-1971.)
- [20] 秦朝. 三轴围压条件下岩石力学性质的实验研究[D]. 成都:西南石油大学, 2014.
(QIN Chao. Experimental study on mechanical properties of rock under three-axis confining pressure[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.)