

锯切加工中金刚石节块的热磨损及 Ti-Cr 涂层对热磨损的抑制作用

于怡青, 曾伟民, 徐西鹏

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362011)

摘要: 在锯切花岗岩过程中, 用三明治薄膜热电偶监测接触界面的温度响应, 研究了节块式金刚石工具与花岗岩接触界面的温度特征, 通过将试验结果与解析结果拟合得到热量传入节块的比例, 并在此基础上求解出金刚石磨粒的表面温度。结果表明, 在干摩擦下的花岗岩锯切过程中, 工具与工件接触弧区内 90% 以上的热量传入金刚石节块, 节块表面部分金刚石磨粒的表面温度超过 1 000 °C, 金刚石的 3 种典型失效方式均受到锯切热的直接影响。在金刚石表面镀覆 Ti-Cr 合金可以有效抑制锯切热引起的磨粒脱落。

关键词: 金刚石; 锯切; 花岗岩; 磨损; Ti-Cr 涂层

中图分类号: O 613 71

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2002)06-0472-05

在使用节块式金刚石工具锯切加工天然石材过程中, 一般采用金属粘结剂将金刚石粘结把持住而实现切削作用。由于锯切用金刚石的价格昂贵, 因此, 减少锯切中金刚石非正常脱落的比例对提高锯切效率和降低加工成本十分重要。

研究表明, 在金刚石节块的热压烧结过程中, 烧结温度引起石墨化是导致金刚石损伤的主要因素^[1,2]。而在加工中, 由于金刚石工具与岩石之间的相对运动速度很快, 天然石材和金刚石的硬度都较高, 在刀具与工件界面可能产生大量的摩擦热, 导致金刚石热损伤并加速刀具的磨损。有些研究, 我们曾研究了

锯切加工中的热磨损现象^[3,4], 但尚未深入探讨金刚石工具锯切花岗岩过程中界面温度的影响。相对于金刚石工具烧结过程中温度影响的研究而言, 锯切过程中热影响方面的研究明显较为欠缺。本文通过在线监测锯切弧区的温度特征, 求解金刚石磨粒的热负荷大小, 探讨锯切过程中金刚石节块的热磨损机制, 并考察 Ti-Cr 涂层在抑制金刚石工具热磨损方面的作用。

1 实验部分

试验装置及测试系统示意图见图 1。在 HPSM-1 型高精度专用锯切试验机上以顺切方式进行锯切试

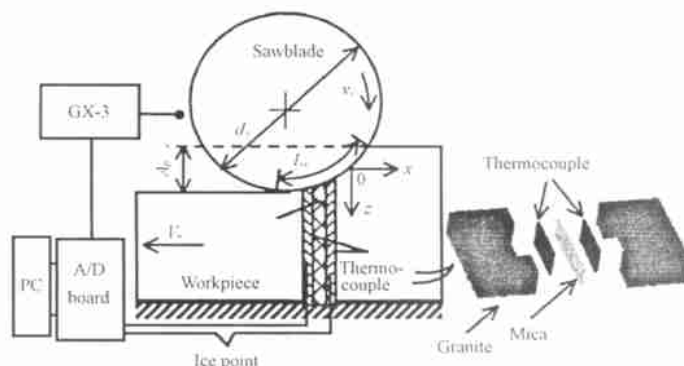


Fig 1 Illustration of the experimental set-up

图 1 试验测试系统示意图

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50175030); 福建省自然科学基金资助项目(F0110002)。

收稿日期: 2002-01-07; 修回日期: 2002-04-20/联系人徐西鹏, E-mail: xpxu@hqu.edu.cn

作者简介: 徐西鹏, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事硬脆材料加工、超硬磨料应用及加工过程摩擦学研究。

验 金刚石锯片的直径 d_s 为 400 mm, 节块宽度 $b=3.4$ mm. 所用金刚石粒度 50/60 (280~360 μm), 浓度 30 (1.32 carat/ cm^3); 采用铁基粘结剂 用 XTL-1 型光学体视显微镜测定节块表面金刚石磨损状态百分比 用 JSM-5410 型扫描电子显微镜 (SEM) 分析金刚石形貌及其同粘结剂的结合状态 锯切试验用工件材料为灰色中硬天然花岗石 (石英 20%~25%, 长石 65%~70%, 云母及其它成分 10%, 肖氏硬度 90~93); 锯片线速度 $v_s=30$ m/s 用三明治热电偶测量锯切过程中锯片与花岗石接触区的表面温度^[5]. 该热电偶由康铜薄膜和纯铁薄膜组成, 2 个薄膜之间用云母片绝缘; 热电偶冷端埋入冰水中; 测温过程中不加切削液 试验中所测热电偶信号的输出经放大后送入 A/D 板和计算机采样记录, 然后用 Matlab 对信号进一步处理分析 锯切过程中, 用 GX-3 型专用功率测量仪测量主轴功率; 功率仪输出信号同样送入计算机采样记录

2 结果及分析

2.1 工具与花岗石界面温度特征

图 2 所示为锯切过程中三明治热电偶所测典型

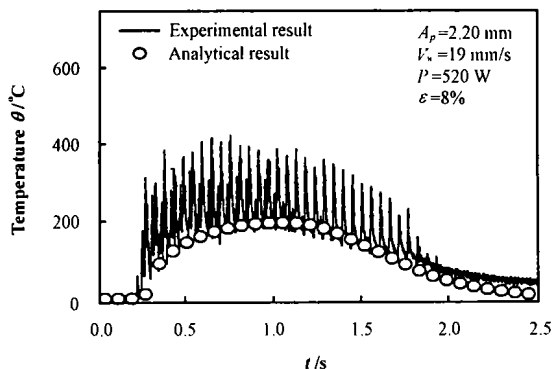


Fig 2 Temperature response versus time and the analytical results

图 2 实测温度随时间变化曲线及解析结果

温度信号 该温度信号类似于磨削温度信号^[5], 由 2 部分组成: 一部分为变化较平缓的背景信号, 即图中的下包络线部分; 另一部分为波动部分 其中背景温度对应工具与工件接触弧区的平均温度

根据已有的关于磨削温度场的结果, 可以采用三角形分布的似稳态移动热源模型从理论上求解工具与工件接触弧区平均温度^[5]. 该模型假设在 $x-z$ 平面内沿接触弧区长度 L_c 分布为三角形热源 基于这一移动热源模型, 工件内任意点 (x, z) 的温升可表示为^[5,6]:

$$\theta(x, z) = \frac{2\epsilon q \alpha}{\pi k V_w} \int_{x-L}^{x+L} e^{-u} K_0 \{ (Z^2 + u^2)^{1/2} \} du \quad (1)$$

式中: q 代表工具与工件接触区的总的平均热流密度, 可根据加工中所消耗的功率 P 得到:

$$q = \frac{P}{b L_c} \quad (2)$$

式中: ϵ 为热量传入工件的比例, k 和 α 分别为工件的热导率和热扩散系数; V_w 为工件速度; b 为金刚石节块的宽度; L_c 为接触区长度 ($=\sqrt{A_p d_s}$); K_0 为零阶的第二类修正贝塞尔函数; L 为无量纲 Peclet 数; x 为距热源中心的无量纲距离; z 为距工件表面的无量纲距离, 其定义参见文献^[5].

式(1)等号右侧除 ϵ 外, 都为已知解 将实测的整条温度曲线与理论计算的温度曲线进行比较、拟合, 即可寻找到 1 个最佳 ϵ , 使得计算的理论曲线与实际测量曲线最吻合, 该 ϵ 即为锯切过程中热量传入工件的比例 图 2 中同时给出了 $\epsilon=8\%$ 时的温度解析结果 在以上计算中, 未考虑锯片断续结构的影响 如果同时考虑本文试验所用锯片的断续比 (0.85), 则采用式(2)所求解的热流密度应增加 $1/0.85$, 也就是所求解的 ϵ 将由 8.0% 增加为 9.4%. 由于传入工件的热量比例不到 10%, 因此, 绝大部分 (90% 以上) 热量传给了金刚石节块 这是由于金刚石的导热特性比花岗石的高得多^[5], 且所使用的金刚石工具具有节块式结构所致

2.2 磨粒温度解析

通过热量传入工件的比例 ϵ , 就可以采用移动热源模型求解金刚石磨粒温度 Farris 等^[7]推导的单点金刚石磨削陶瓷材料时的磨粒表面温度计算公式为:

$$\theta = \frac{2q}{\pi \rho C V_s} \{ (X+R) e^{-(X+R)} [K_0(X+R) - K_1(X+R)] - (X-R) e^{-(X-R)} [K_0(X-R) - K_1(X-R)] \} \quad (3)$$

式中: $X = v_s x' / 2\alpha$, $R = v_s r / 2\alpha$, K_1 和 K_0 分别为一阶和零阶第二类修正贝塞尔函数; $\beta = v_s / \alpha$, $\alpha = k / \rho C$, $x' = x - v_s t$, t 为热源作用的时间, r 为热源宽度 对于接触半径为 r 的圆形磨粒接触状态, 单位面积单位时间所产生的热量可以表述为:

$$q' = \frac{(1-\epsilon)P}{\pi C b L_c r^2} \quad (4)$$

式中: C 为金刚石节块表面磨粒数, 可通过体视显微镜观察得到

假设金刚石节块表面的磨粒露出高度均匀一致, 金刚石切削端夹角为 120° , 则根据磨粒运动过程的几

何分析, r 等于单颗磨粒最大切削厚度 h_m ^[8]. 由于实际锯切过程中节块表面金刚石磨粒在空间位置和接触状态上的差异, 每一不同金刚石磨粒的 r 均为变量. 为了便于定量分析, 假设 $r = x \% h_m$; 图3给出了不

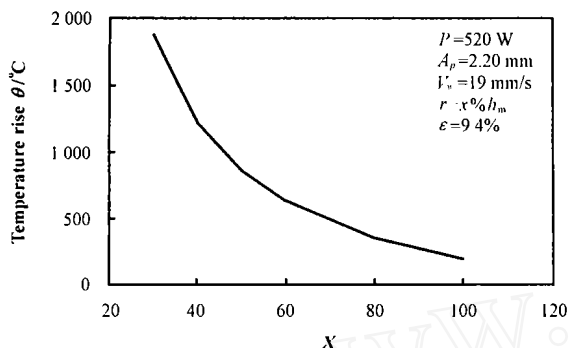


Fig 3 Calculated temperatures on diamond grit

图3 金刚石磨粒表面温度解析结果

同 x 所对应的磨粒表面温度计算结果, 其中 x 反映实际参与切削和散热磨粒的状态. 根据节块表面金刚石磨粒露出高度分布的已有研究结果可以确认, 加工中部分磨粒的接触半径小于 h_m 的40%; 也就是说, 在节块表面部分磨粒的表面温度超过1000, 这远高于一般金刚石磨粒的石墨化温度.

2.3 金刚石节块的热磨损机制分析

锯切过程中金刚石的失效主要源于直接磨损、破碎和脱落^[3,4]. 由于锯切过程中金刚石与花岗石之间的相对运动速度很快, 金刚石磨粒表面承受连续不断的反复摩擦而产生机械磨损. 当金刚石磨粒表面温度过高时, 这种磨损过程将会加剧. 图4所示为锯切后



Fig 4 SEM morphology of worn diamond surface (750×)

图4 金刚石表面的磨损痕迹 (×750)

金刚石节块磨损表面形貌 SEM 照片. 尽管金刚石节块发生直接磨损的磨粒的面积很小, 难以通过 x 射线衍射分析确定磨损表面是否产生了化学反应或石墨化, 从图4所示的形貌特征仍可以推测可能发生了某种界面反应.

一般认为, 锯切中金刚石的破碎主要是由于冲击

力作用所致^[4]. 但是应该指出, 人造金刚石内部含有含量不等的镍、钴及铁等金属夹杂物, 这些夹杂物的热膨胀系数均大于金刚石的膨胀系数; 当金刚石磨粒承受较高温度时, 金刚石基本不发生膨胀, 而磨粒内部的金属夹杂物急剧膨胀, 因而也可导致金刚石开裂.

金属和金刚石在热膨胀系数上的差异在锯切过程中更多地反映在磨粒脱落方面. 由于金刚石优异的导热特性, 进入金刚石的热量会迅速到达金刚石与金属粘结剂的结合界面 (参见图5中黑粗线所示部分).

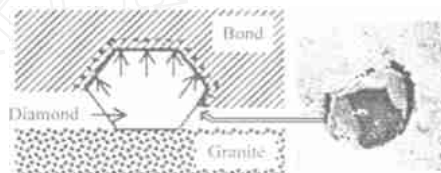


Fig 5 Heat-induced deformation at the matrix-diamond interface

图5 粘结剂与金刚石结合界面的热变形示意图

在结合界面处, 金属粘结剂急剧膨胀而金刚石几乎不膨胀. 但是金刚石的前端与花岗石处于紧密接触状态, 金属粘结剂在此处无膨胀空间, 从而在金刚石与粘结剂结合界面形成一对反作用力. 当结合截面温度足够高、粘结剂膨胀量足够大时, 将会导致结合截面周围的金属发生热塑性变形. 当金刚石磨粒离开加工弧区后, 结合界面温度降低, 磨粒与粘结剂结合界面周围的金属遇冷收缩 (参见图5中黑粗虚线所示部分). 由于金刚石节块中的粘结剂对金刚石的粘结作用以机械咬合为主, 因此, 粘结剂与金刚石结合界面易出现裂痕, 并在后续的切割中导致金刚石磨粒脱落 (参见图5).

2.4 Ti-Cr 合金涂层对金刚石热磨损的抑制作用

根据上述关于金刚石节块热磨损机制的分析, 抑制锯切热量的产生和积极疏导产生的热量是抑制金刚石热磨损的关键. 因此, 可以通过优化加工参数、使用优异的润滑介质以及独特的润滑方式等途径来减少摩擦热量的产生, 也可以通过设计新颖的工具结构和采用有效的冷却方式来加快产生热量的排放. 但即使如此, 在很多情况下仍会在金刚石与粘结剂界面出现热裂纹. 事实上, 从图5可以看出, 如果金刚石与粘结剂之间具有良好的化学冶金结合, 则可在很大程度上延缓热裂纹的出现. 基于已有的研究成果, 我们采用微蒸发镀膜技术在金刚石表面镀覆 Ti-Cr 合金涂层^[9~12], 以增加粘结剂对金刚石磨粒的化学键合力, 同时还可以依靠镀膜缓冲热量传递给粘结剂.

图6给出了金刚石与涂层以及金刚石与粘结剂界面的SEM照片。可见,金刚石与涂层以及金刚石与

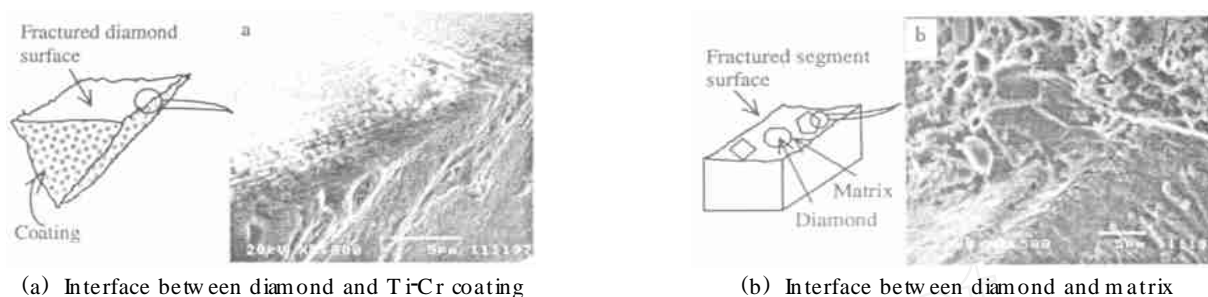


Fig 6 Diamond-coating and diamond-matrix interfaces

图6 金刚石与涂层以及金刚石与粘结剂界面的SEM照片

粘结剂的结合均十分紧密。为了定量评价涂层的使用效果,用体视显微镜观察锯切后的节块表面金刚石磨损状态,结果表明,和未镀膜金刚石相比,镀膜金刚石使磨粒的脱落率降低了将近20%,破碎比例降低了约5%。

3 结论

a 在干锯切花岗石过程中,金刚石节块与花岗石接触界面所产生的热量有90%以上传入金刚石节块,其原因主要源于金刚石的高导热性和金刚石锯切工具的节块式结构。

b 三角形热源模型的温度计算结果与实验所测曲线的拟合结果表明,锯切弧区热源呈三角形分布。

c 磨粒表面温度计算表明,锯切过程中在节块表面有一部分金刚石磨粒的表面温度超过1000℃,金刚石失效方式会受到锯切热的直接影响。

d 在金刚石表面镀覆Ti-Cr合金可以有效抑制锯切热引起的磨粒脱落,并可在一定程度上降低破碎比例。

参考文献:

- [1] Dwan J D. Manufacture of diamond impregnated matrixes[J]. Materials Science and Technology, 1998, 14(9-10): 896-900.
- [2] Liao Y S, Luo S Y. Effects of matrix characteristics on diamond composites[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28: 1245-1251.
- [3] Xu X P(徐西鹏), Shen J Y(沈剑云), Huang H(黄辉). Characteristics of Diamond Segment Wear and Influencing Factors in Sawing of Granites(锯切花岗石过程中金刚石节块

磨损特征及影响因素分析)[J]. Tribology(摩擦学报), 1998, 18(2): 162-166.

- [4] Liao Y S. Wear characteristics of sintered diamond composite during circular sawing[J]. Wear, 1992, 157: 325-337.
- [5] Xu X P(徐西鹏), Malkin S. Energy Partition at the Diamond-workpiece Interface in Grinding of Granite(金刚石砂轮与花岗石摩擦界面能量传输特征研究)[J]. Tribology(摩擦学报), 2001, 21(1): 1-5.
- [6] Kohli S, Guo C, Malkin S. Energy partition to the workpiece for grinding with aluminum oxide and CBN abrasive wheels[J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1995, 117: 160-168.
- [7] Farris T N, Chandrasekar S. High-speed sliding indentation of ceramics: thermal effects[J]. Journal of Materials Science, 1990, 25: 4047-4053.
- [8] Malkin S. Grinding technology-theory and application of machining with abrasives[M]. England: Ellis Horwood Limited, 1989.
- [9] Zang J B(臧建兵), Zhao Y C(赵玉成), Wang Y H(王燕辉), et al. Superhard Abrasives Cladding Technology and Its Application(超硬材料表面镀覆技术及应用)[J]. Diamond and Abrasives Engineering(金刚石与磨料磨具工程), 2000, (3): 8-12.
- [10] Duda T M. Interaction of Diamond-coating-bond Interfaces[J]. Soviet Journal of Superhard Materials, 1986, 8(5): 38-41.
- [11] Xu X P(徐西鹏), Li Y(李远), Shen J Y(沈剑云). Retention of Diamonds in Metal Bonds and the Techniques to Increase the Retention(结合剂中金刚石固位机理及提高结合剂固位能力的技术)[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8, (S2): 8-12.
- [12] Pei Y T(裴宇韬), Tu H Z(屠厚泽), Li M H(励美恒). Heat Resistance of Coated Diamonds and Effect of the Coatings(镀膜金刚石的耐热性及其镀层作用机制)[J]. Journal of Synthetic Crystals(人工晶体学报), 1994, 23(3): 195-201.

Thermal Wear of Diamond Segments in Sawing and Its Restraining by Ti-Cr Coating

YU Yi-qing, ZENG Weimin, XU Xipeng

(College of Mechatronics and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362011, China)

Abstract: The temperature responses at the tool-workpiece interface during circular sawing of a typical gray natural granite with diamond segmented blades were measured by using a foil thermocouple consisting of two thin foils sandwiched in a split workpiece specimen. The sawing experiments were conducted in a down cutting mode on a bridge-type experimental sawing machine. Scanning electron microscope and optical microscope were employed to observe the morphologies of diamond grits and their bonding with the metal matrix. The measured results, taking into account the net sawing power, were fitted with the theoretical counterparts so as to estimate the heat partition transferred to the granite and the segments, using a temperature matching technique. Based on the heat partition value obtained from the experiments, the diamond tip temperature was calculated. As the results, more than 90% of the heat generated at the cutting zone was conducted to the diamond segments during the dry sawing. The tip temperatures at a part of the diamond grits on the segment surfaces were possibly above 1000 °C. The three typical wear modes of the diamond grits, namely, mechanical wear, fracture, and pull-out, were closely related to the heat generated during the sawing process. When the diamond grits were coated with Ti-Cr alloy before sintering, strong metallurgical bonding was observed between the diamond grits and the metal matrix. Thus Ti-Cr coating was effective in restraining the heat induced pull-out of the diamond grits.

Key words: diamond; sawing; granite; wear; Ti-Cr coating

Author: XU Xipeng, male, born in 1965, Ph.D., Professor, E-mail: xpxu@hqu.edu.cn