

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201712065



机械臂加工花岗岩的力和工具磨损特性

黄吉祥, 刘舒颖, 黄辉, 黄身桂, 徐西鹏

(华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用机械臂对花岗岩进行加工试验, 测量磨削力, 观察工具磨损, 分析磨削力随时间和位置的变化及工具磨损特性. 结果表明: 随着加工的进行, 磨削力随之增加, z 方向的磨削力明显大于 x, y 方向的磨削力; 磨削工具观察到镀层剥落、磨粒磨平、微破碎和宏观破碎几种失效形式; 同一节块上的切入部位磨损严重, 出露高度降低速率最快, 切出部位最慢; 工具的磨损与磨削力之间相互影响, 随着工具失效增加, 磨削力随之增加.

关键词: 机械臂; 花岗岩; 磨削力; 磨损

中图分类号: TG 506 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2018)02-0159-07

Forces and Tool Wear Characteristics in Granite Grinding by Robotic

HUANG Jixiang, LIU Shuying, HUANG Hui,
HUANG Shengui, XU Xipeng

(Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The grinding forces and tool wear from granite grinding using a robotic were measured. The characteristics of grinding forces and tool wear in different machining stages and different machining locations were investigated. The experimental results show that the grinding forces increase in the process of machining, the grinding force in z direction is significantly greater than those in x and y directions. The tool wear characteristics include flattened, micro-fractured, macro-fractured abrasives and coating peeling. There is a more seriously wear and larger decrease rate of abrasive exposed heights in the cut-into parts, and in reverse in the cut-off parts. Tool wear and the grinding force are influenced each other. The grinding forces increase with the increase of tool wear.

Keywords: robot; granite; grinding force; wear

花岗岩具有硬度高、耐磨损等特点, 因此, 常用于高级建筑装饰工程、大厅地面, 更是露天雕刻的首选之材. 目前, 石材雕刻加工逐步由传统手工向机械化、智能化发展, 加工中心和机械臂是其机械化智能化的主要手段. 刘岩^[1]对异型石材车铣复合加工中心各个功能模块的机械结构及其运动关系进行分析. 单金凤^[2]、张善永^[3]对石材工艺制品雕刻机器人加工系统进行设计研究. 吴涛^[4]、朱鸿巍^[5]对石材雕刻 CAD/CAM 系统进行研究. 齐凤莲等^[6]基于 RBF 神经网络对加工中心加工花岗岩的铣削力进行预测

收稿日期: 2017-12-27

通信作者: 黄辉(1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事高效精密加工和脆性材料加工技术的研究. E-mail: huangh@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51235004, 51375179); 福建省泉州市科技计划项目(2016G048)

研究. Pan 等^[7]研究了机器臂加工过程中的颤振. Wang 等^[8]对机器人钻削过程中的切削力进行建模和实验验证分析. 力的特性是花岗岩加工过程中的一个重要的过程参量, 决定了工具的载荷, 从而决定工具的加工能力. 学者们在力的特性方面进行了大量研究. 徐西鹏等^[9]研究了锯切过程中花岗石与金刚石间的摩擦效应. 祝小威等^[10]对金刚石薄锯片高速锯切花岗石过程中的锯切力、力比、单颗金刚石承受的平均载荷进行分析. 关砚聪等^[11]采用钎焊金刚石砂轮进行花岗岩正交试验, 分析切削速度、进给速度和切削深度对切削力的影响. 叶勇等^[12]对单颗金刚石磨削花岗石中的磨削力进行离散单元分析及实验验证. Polini 等^[13]对石材锯切加工中的锯切力和工具磨损进行了研究. Turchetta^[14]进行单颗磨粒加工石材的研究, 分析不同状态下单颗磨粒切削力的变化. 目前, 对于锯切力及工具磨损的研究多集中在常规机床, 而对于机械臂雕刻的加工形式中, 磨削力及工具磨损的研究并不多见. 因此, 本文对利用机械臂加工花岗岩时的磨削力及工具磨损特性进行研究, 分析磨削力随加工位置、加工时间的变化趋势和工具磨损的特点.

1 试验方案

1.1 试验加工系统

试验在石材智能加工系统上进行, 该系统由德国 KUKA 公司 KR240R2900 型 6 轴机械臂、HSD 电主轴、刀具测量装置、刀库、控制与 CNC 软件、Artec 3D 扫描系统和旋转工作台组成. 加工示意图, 如图 1 所示.

采用意大利 NICOLAI 公司生产的电镀金刚石砂轮为加工工具, 其直径为 50 mm, 高度为 20 mm, 由 8 个节块组成, 如图 2 所示. 所用金刚石粒径为 465~561 μm , 密度为 271 颗 $\cdot \text{cm}^{-3}$.

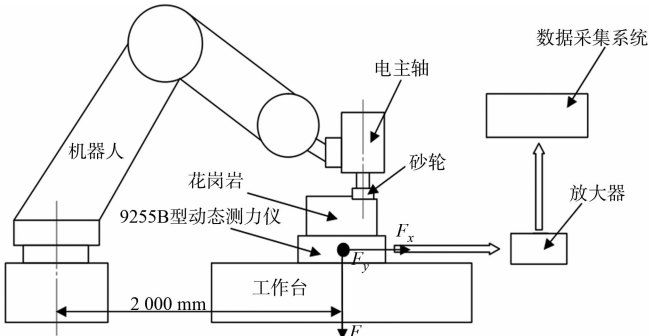
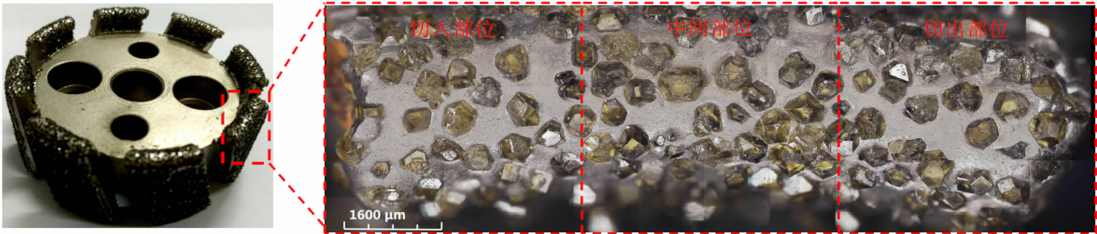


图 1 机器人磨削加工花岗岩加工示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grinding granite by robotic



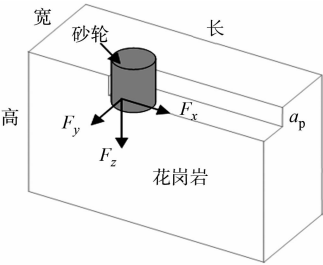
(a) 表面形貌

(b) 形貌放大图

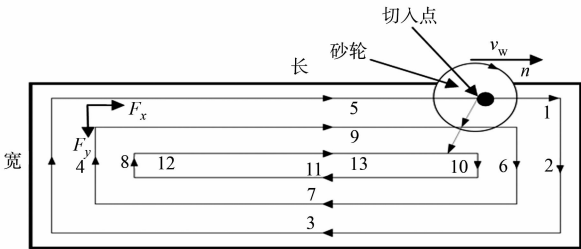
图 2 电镀金刚石砂轮的表面形貌及放大图

Fig. 2 Surface morphology and enlarged morphology of electroplated diamond wheel

山西黑为加工试件, 其尺寸为 330 mm(长)×110 mm(宽)×253 mm(高). 山西黑的主要成分(质量分数)为 35%辉石, 3%云母, 2%石英, 60%斜长石, 肖氏硬度为 101, 抗折强度为 41.6 MPa, 抗压强度为 205.6 MPa, 颗粒尺寸为 100~500 μm , 吸水率为 0.05%. 在 330 mm×110 mm 面上进行端磨, 砂轮磨削花岗岩模型及其加工轨迹, 如图 3 所示, 砂轮沿编号顺序进行运动.



(a) 砂轮磨削花岗岩模型



(b) 加工轨迹示意图

图 3 电镀金刚石砂轮磨削花岗岩模型及其加工轨迹

Fig. 3 Granite grinding model and schematic diagram of machining track by electroplated diamond wheel

1.2 工艺参数

磨削加工工艺参数:主轴转速 n 为 $6\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$;工件进给速度 v_w 为 $5\,000\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$;磨削深度 a_p 为 1 mm ;径向加工宽度 b 为 22.5 mm .

冷却液为自来水,由加工参数及图 3 可知,机械臂从轨迹 1 至轨迹 13 完成一次磨削时,去除材料体积为 q . 随着加工的进行,累计去除材料体积记为 Q ,即 $Q=N\times q$. 其中, $q=L\times W\times a_p=330\times 110\times 1=36\,300\text{ mm}^3$, N 为加工层数, L 为加工长度, W 为加工宽度, a_p 为磨削深度.

1.3 磨削力测量及磨损形貌

试验采用 Kistler 9255B 型动态测力仪、5080 型信号放大器及 5697A 型数据采集装置组成的磨削力测量采集系统,实时测量采集 x, y, z 三个方向的磨削力,记为 F_x, F_y, F_z ,采集频率为 $5\,000\text{ Hz}$;工具形貌观测采用浩视 KH-8700 型三维视频显微镜.

2 试验结果

2.1 磨削力

2.1.1 典型磨削力信号 机械臂按照磨削加工轨迹(图 3 (b))加工过程中的原始磨削力信号,在 Origin 软件中进行低通滤波(10 Hz)后,获得的磨削力信号曲线图,如图 4 所示.

图 4 中:磨削过程的合力值 $F=\sqrt{F_x^2+F_y^2+F_z^2}$.

由图 4 可知:磨削力呈现周期性变化,轨迹 1,2,4,6,8,10,12 的磨削力未达到稳态,波动性较大;而轨迹 3,5,7,9,11,13 磨削力的持续作用时间较长,均达到稳态;在轨迹 7,9,11 时,所有力的幅值均较大,稳定时间也较长. 对于所有力的幅值而言,轨迹 1~6,12,13 均小于轨迹 7~11,结合对实际加工的观察,发现主要原因是加工过程中出现实际径向加工宽度小于设计径向加工宽度 b .

在整个磨削轨迹中, F_x, F_y 的方向会产生变化. 在轨迹 2,3,6,7,10,11 时, F_x 为负方向的力,其余轨迹为正方向的力. 在轨迹 1,2,5,6,9,10,13 时, F_y 以正方向为主,其余轨迹以负方向为主. 相比而言, F_z 则只有一个方向的力. 合力 F 除力值比 F_z 更大外,其变化规律与 F_z 一致.

2.1.2 磨削力随时间的变化 试验多次重复采集磨削力信号. 加工轨迹 7 获取的磨削力信号经 10 Hz 低通滤波后,得到的磨削力信号曲线,如图 5(a)所示. 由图 5(a)可知: F_x, F_y, F_z, F 在该轨迹加工过程中均可分为切入区、稳态区、切出区 3 个区域^[15],在切入和切出的过程中,磨削力逐渐增大或减小,稳态区的磨削力较为稳定. 这是因为砂轮与花岗岩的接触弧长随着加工的进行逐渐增大或减小,当接触弧长最大时,达到稳态过程,磨削力基本保持不变. 因此,选择各轨迹稳态力信号进行分析.

轨迹 7 磨削力稳态值随累计去除材料体积 Q 的变化特征,如图 5(b)所示. 在保持加工参数不变的情况下,随着材料去除体积的增加, F_x, F_y 始终为负值,即 x, y 两个方向的力与图 1 所示的方向相反,

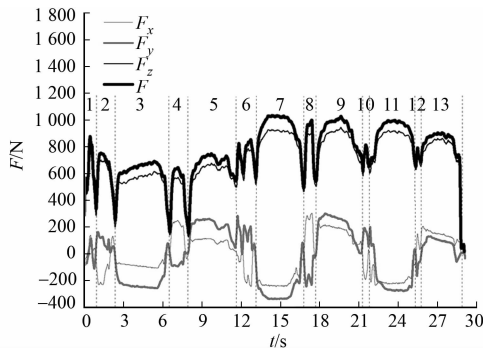
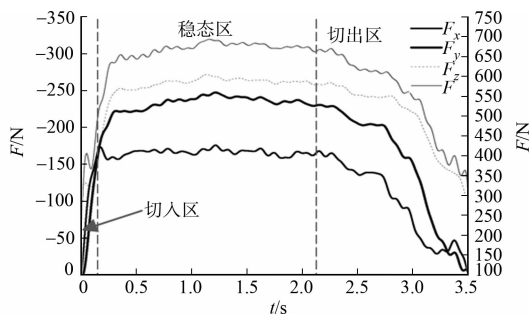
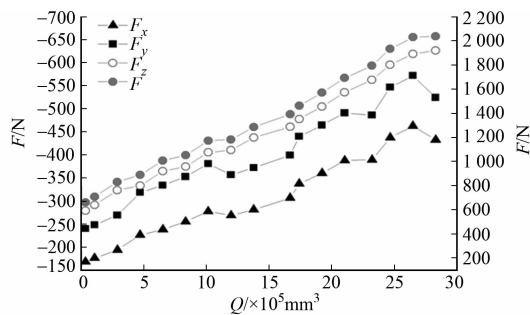


图 4 磨削加工轨迹 1~13 的磨削力信号曲线
Fig. 4 Grinding force signal curve of grinding track 1~13



(a) 磨削力信号曲线



(b) 稳态值随 Q 的变化特征

图 5 轨迹 7 的磨削力信号曲线及其稳态值的变化特征

Fig. 5 Grinding force signal curve of track 7 and its variation characteristics of steady-state value

力的幅值呈线性增加的趋势,且其变化斜率大体一致; z 方向的力 F_z 始终大于零,即 z 方向的力与图 1 所示的方向相同,垂直工件向下, F_z 和合力 F 呈增长趋势,且趋势一致. 从力的幅值上可以看出, F_z 方向的力明显大于另两个方面的力,且 F_x 方向的力最小.

2.1.3 磨削力随位置的变化 轨迹 7,9 的磨削力随加工过程进行的趋势图,如图 6 所示. 由图 6 可知:随着加工的进行,所有方向的力均大致呈现线性增长的趋势,在 x, y 两个方向上,力的幅值相互交替地变化,并没有明显的差距;但在 z 方向可以看出,轨迹 9 的力会大于轨迹 7 的力,随着加工的进行,两段轨迹力的幅值差距略有增加;合力表现出与 z 向力相同的变化趋势.

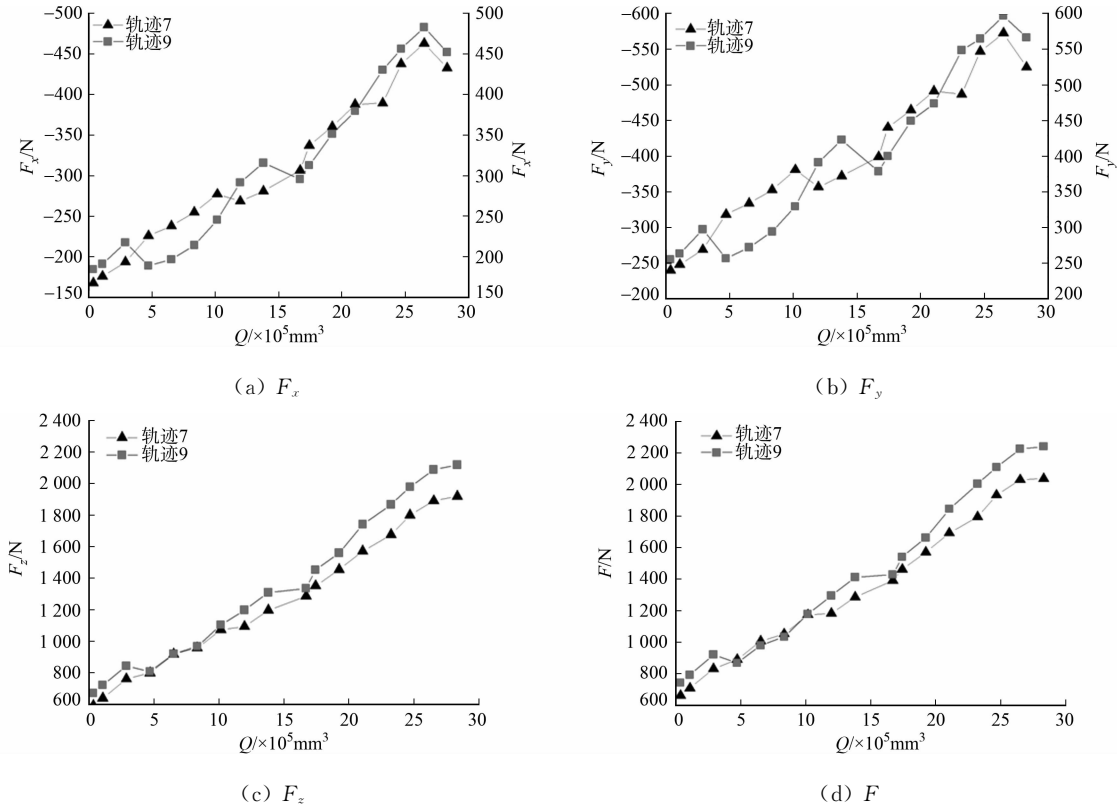


图 6 轨迹 7 和 9 的磨削力的变化特征
Fig. 6 Variation characteristics of grinding force in track 7 and 9

2.2 工具磨损

通过对砂轮底部的观察,可以看出几种典型的工具磨损形式,如图 7 所示. 由图 7 可知:砂轮底部的磨损有 2 种情况,一种是工具整体的破碎,表现为工具从基体部分发生较大面积的镀层剥落(图 7(a));另一种是磨粒的磨损(图 7(c)~(e)). 对加工后整个砂轮表面的磨粒观察可以看出,磨粒状态主要包括完整、磨粒微破碎、磨平和宏观破碎 4 种形貌(图 7(b)~(e)).

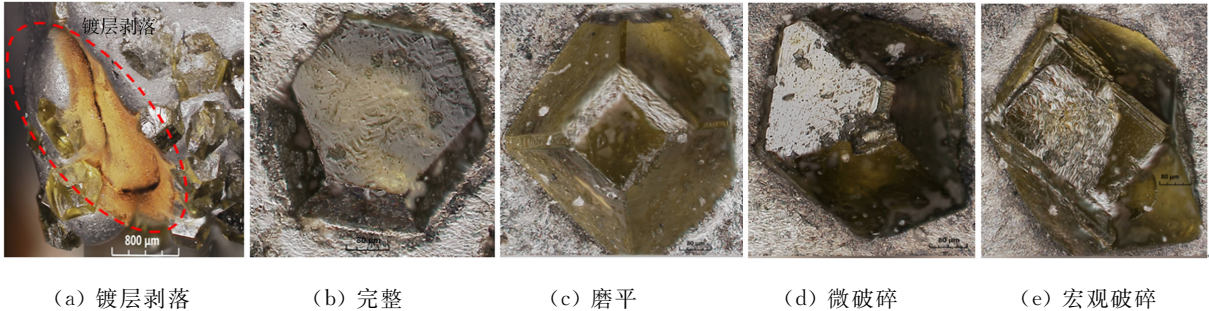


图 7 电镀金金刚石砂轮镀层剥落及磨粒状态形貌

Fig. 7 Coating peeling and grains morphology of electroplated diamond wheel

选取该工具其中 4 个节块,将每个节块底部按接触工件的先后顺序,均匀划分为切入部位、中间部位和切出部位,如图 2 所示. 对工具底部不同位置的磨粒形貌进行分类统计,得到的工具磨损分布变化

图,如图 8 所示. 图 8 中: η 为不同磨损形式占比; h 为磨料出露高度.

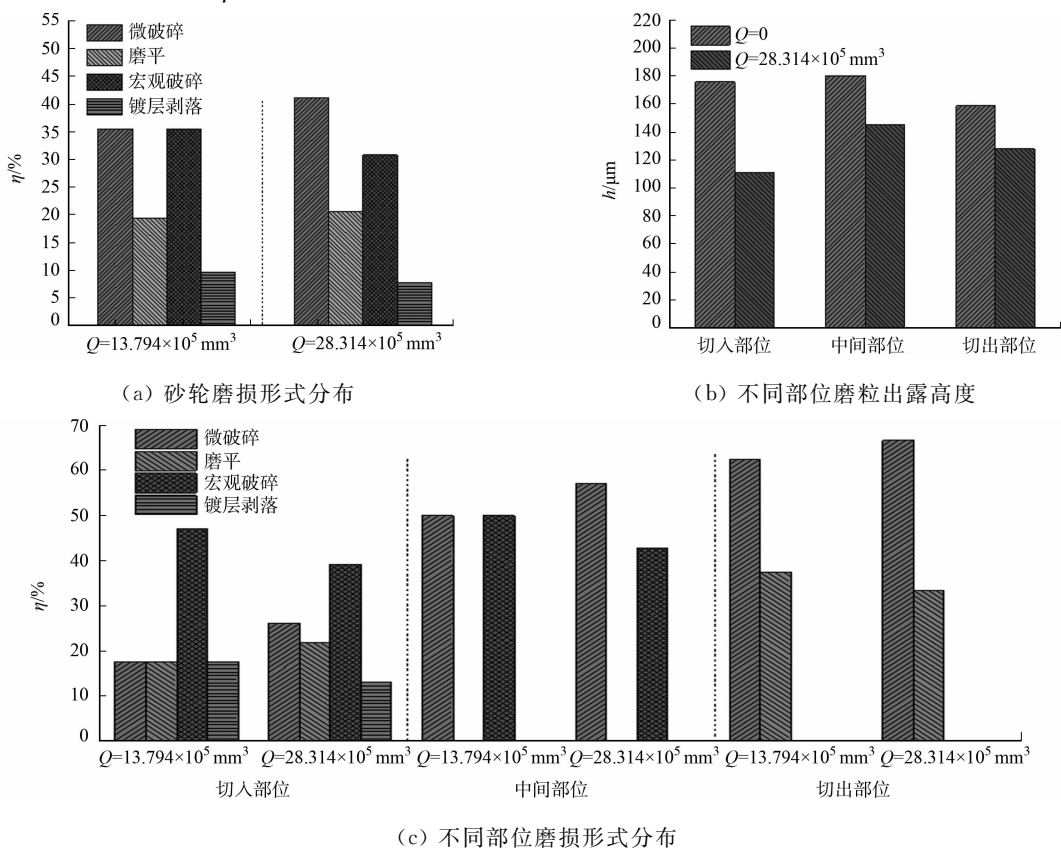


图 8 电镀金刚石砂轮随累计去除材料体积 Q 的变化特征

Fig. 8 Electroplated diamond wheel variation characteristics with cumulative removal of material volume Q

由图 8(a)可知:随着加工的进行,该工具底部表面磨粒微破碎和磨平占比逐渐增加,磨粒宏观破碎和基体破碎占比逐渐减少. 不同位置的磨损也各不相同,如图 8(c)所示. 切入部位的磨损主要表现为:加工前期磨粒宏观破碎占比较高;随着去除材料体积的增长,磨粒宏观破碎、基体破碎占比略有降低,磨粒微破碎和磨平占比增加. 中间部位的磨损主要表现为:加工前期主要为磨粒宏观破碎和微破碎;随着去除材料体积的增长,磨粒微破碎占比略有增加. 切出部位的磨损主要表现为:加工前期磨粒微破碎占比较高,磨粒磨平占比较低;随着去除材料体积的增长,磨粒微破碎占比略有增加. 在中间部位和切出部位均没有观察到基体破碎的磨损形式.

结合图 7 可以看出,基体破碎主要是由于电镀层与钢基体之间的把持不牢,加工初期在工具前端受到较大切削力的冲击,容易产生剥落,但强度不足的电镀层剥落后,就较少出现这类破碎形式了. 相对不同位置可以发现,切入部分和中间部分的金刚石磨粒多表现为宏观破碎. 相比而言,切出部分的金刚石磨粒多表现为微破和磨平.

不同底部部位,磨粒出露高度随累计去除材料体积 Q 的变化特征,如图 8(b)所示. 由图 8(b)可知:节块的切入、中间和切出 3 个部位磨粒出露高度均随着加工的进行逐渐降低,但各部位的降低速率快慢不一. 磨粒出露高度降低速率最快的部位为切入部位;其次为中间部位;最慢的是切出部位.

3 讨论与分析

3.1 磨削力比的变化

在试验过程中,测量获得工具在加工过程中的三向力,根据工具与工件的相对状态(图 1)可知, F_x 、 F_y 均作用在同一平面上,可将 F_x 和 F_y 的矢量合力定义为切向磨削合力 F_t ;而 F_z 表面工具垂直于工件的作用力,可定义为法向磨削力 F_n . 为方便分析比较,将轨迹 i 的切向力和法向力分别定义为 $F_{t,i}$ 和 $F_{n,i}$. 法向力 F_n 和切向力 F_t 随材料去除体积的曲线图,如图 9(a)所示. 由图 9(a)可知:无论轨迹 7 还是

轨迹 9 加工,法向力和切向力均随着材料去除体积的增加而增加,法向力均大于切向力;轨迹 9 的法向力始终大于轨迹 7,且随着材料去除体积的增加,差值逐渐增加,而切向力无明显规律。

磨削力比作为材料磨削难易程度衡量的一个重要参量,也反映了砂轮表面磨粒的锋利度,可以用来评价砂轮的磨削性能。轨迹 7,9 的磨削力比 F_n/F_t 随累计去除材料体积 Q 变化的趋势图,如图 9(b)所示。由图 9(b)可知:随着加工的进行,磨削力比逐渐增加,工具的磨削能力逐渐降低,这与工具的磨损趋势一致;随着加工的进行,轨迹 7 的磨削力比轨迹 9 小,增长速度更慢。因此,砂轮在轨迹 7 的切削能力比轨迹 9 更高。

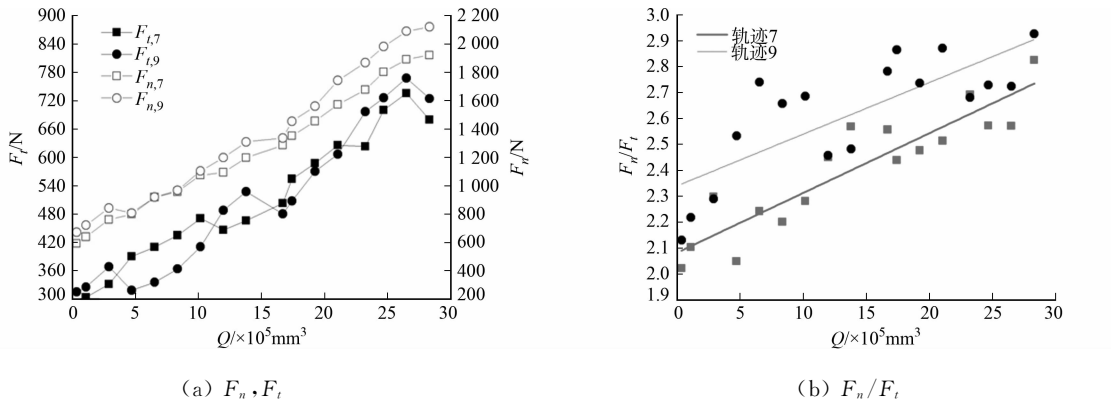


图 9 轨迹 7 和 9 的磨削力及其磨削力比的变化特征

Fig. 9 Variation characteristics of grinding force and grinding force ratio in track 7 and 9

3.2 磨削力与工具磨损之间的相互影响

由图 6 可知:磨削力 F_x, F_y, F_z, F 均随着加工的进行逐渐增加. 对比此时砂轮的形貌可以看出,砂轮在开始使用时,磨粒的出露高度较高,容屑空间较大,有利于磨屑的快速排出,所以磨削力较小;随着加工的进行,磨粒出露高度逐渐降低(图 8(b)),容屑空间减小,造成磨削堵塞,磨削力随之增大. 另一方面,加工的过程中,工具磨损中的磨粒微破碎、磨平两种磨损形式占比逐渐增加,磨粒微破碎会形成新的切削刃,磨削力减小,但磨粒磨平会形成较大的负前角,不利于磨削,磨削力增加. 因此,在上述因素的综合作用下,磨削力随着加工的进行逐渐增加,这与文献[16-17]所得到的结论一致。

磨削力是整个工具在磨削过程的综合表现,对于单个节块而言,其不同位置所承受的磨削力是各不相同的,这可从节块不同位置的磨损中看出. 黄辉等^[18]认为,在金刚石切除花岗石的过程中,对金刚石磨粒作用的机械载荷包括:1) 工件材料对金刚石磨粒的冲击力 F_{Impact} ; 2) 工件材料对金刚石磨粒的摩擦作用力 F_{Friction} ; 3) 工件材料对金刚石磨粒的切削阻力 F_{cut} ; 4) 岩屑对金刚石磨粒的摩擦作用力 F_{swarf} . 随着加工的进行,磨削力逐渐增加,根据力的相互作用原理,作用在金刚石磨粒上的切削阻力 F_{cut} 增加,导致作用在磨粒上的载荷增加,从而加快磨粒的磨损。

试验中,节块的切入部位磨粒出露高度降低速率最快,这表明切入部位磨粒承受载荷更大,当载荷大于镀层结合力时,还出现镀层的剥落. 相比而言,切出部位出露高度降低速率最慢,表明切出部位磨粒承受载荷较小,这与徐西鹏等^[19]认为的冷水槽的存在使锯齿前端承受载荷比末端更大的结论一致。

4 结论

- 1) 当机器臂加工花岗岩时,各个方向的磨削力随加工体积的增加而基本呈现线性增加的趋势,其增加趋势大致相同. z 方向的磨削力明显大于 x, y 方向的磨削力.
- 2) 加工工具主要有镀层剥落、磨粒磨平、微破损和宏观破损几种失效形式. 同一节块上的切入、中间、切出 3 个部位的磨损形式和出露高度变化速率不同,切入部位磨损严重,出露高度降低速率最快,切出部位则最慢.
- 3) 工具的磨损与磨削力之间相互影响,随着工具失效的增加,磨削力随之增加,而节块上不同部位所受的磨削力不同是导致其磨损不均匀的主要原因.

参考文献:

- [1] 刘岩. 数控五轴联动加工在异型石材中的应用研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2013.
- [2] 单金凤. 石材立体工艺制品雕刻机器人的设计与研究[D]. 济南:山东大学,2011.
- [3] 张善永. 石材立体工艺制品雕刻机器人加工技术研究[D]. 济南:山东大学,2012.
- [4] 吴涛. 数控石材雕刻机 CAD/CAM 系统研制[D]. 武汉:中国地质大学,2004.
- [5] 朱鸿巍. CAD/CAM/Robotic 一体化石材雕刻系统研制与实验研究[D]. 厦门:厦门大学,2014.
- [6] 齐凤莲,闫泳旭,张帼英. 基于 RBF 神经网络的花岗岩加工铣削力预测研究[J]. 机床与液压,2015,43(11):37-49-51. DOI:10.3969/j.issn.1001-3881.2015.11.014.
- [7] PAN Zengxi,ZHANG Hui,ZHU Zhenqi,*et al.* Chatter analysis of robotic machining process[J]. Journal of Materials Processing Technology,2006,173(3):301-309. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2005.11.033.
- [8] WANG Guifeng,DONG Huiyue,GUO Yingjie,*et al.* Dynamic cutting force modeling and experimental study of industrial robotic boring[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,86(1):179-190. DOI:10.1007/s00170-015-8166-z.
- [9] 徐西鹏,黄辉,于怡青,等. 锯切过程中花岗岩与金刚石间的摩擦效应[J]. 摩擦学学报,1999,19(4):304-310. DOI:10.3321/j.issn:1004-0595.1999.04.004.
- [10] 祝小威,徐西鹏. 金刚石薄锯片高速锯切花岗岩过程中的锯切力特性[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2007,162(6):1-5. DOI:10.3969/j.issn.1006-852X.2007.06.001.
- [11] 关砚姚,姚德明,郑敏利. 金刚石砂轮加工花岗岩时切削力的正交试验及参数优化[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2009,170(2):53-56. DOI:10.3969/j.issn.1006-852X.2009.02.013.
- [12] 叶勇,徐西鹏. 单颗金刚石磨削花岗岩中力的离散单元分析及试验验证[J]. 摩擦学学报,2009,29(3):215-220.
- [13] POLINI W,TURCHEETTA S. Monitoring of diamond disk wear in stone cutting by means of force or acceleration sensors[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2007,35(5/6):454-467. DOI:10.1007/s00170-006-0733-x.
- [14] TURCHEETTA S. Cutting force on a diamond frit in stone machining[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2009,44(9/10):854-861. DOI:10.1007/s00170-008-1905-7.
- [15] 邹俊枫,焦彬,王贵成. 42CrMo 钢磨削淬硬加工中磨削力的研究[J]. 机械设计与制造,2015(11):112-115. DOI:10.3969/j.issn.1001-3997.2015.11.028.
- [16] 陈建毅,徐西鹏. 钎焊金刚石砂轮高速磨削氧化铝陶瓷的磨损特征[J]. 组合机床与自动化加工技术,2011(12):93-98. DOI:10.3969/j.issn.1001-2265.2011.12.024.
- [17] 李远. 花岗岩超大切深锯切机理与技术研究[D]. 泉州:华侨大学,2004.
- [18] 黄辉,詹友基,徐西鹏. 磨削花岗岩过程中钎焊金刚石磨损特征分析[J]. 摩擦学学报,2007,27(3):279-283. DOI:10.3321/j.issn:1004-0595.2007.03.017.
- [19] 徐西鹏,沈剑云,黄辉. 实现花岗岩高效锯切的关键因素分析[J]. 机械工程学报,1998,34(1):104-110. DOI:10.3321/j.issn:0577-6686.1998.01.018.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:崔长彩)