

金刚石圆锯片锯解花岗石切削力及参数优化的实验研究

郑春英, 张进生, 王志, 张政梅, 高胜

山东大学; 山东省石材工程技术研究中心; 高效洁净机械制造教育部重点实验室(山东大学)

摘要: 基于金刚石圆锯片锯解花岗石的切削力正交实验研究, 对切削速度、进给速度和背吃刀量三因素影响切削力的显著性进行极差分析, 得出切削力 F_x 、 F_y 、 F_z 随切削速度的增大而减小, 随进给速度和背吃刀量的增大而增大的变化趋势。通过回归分析建立切削力数学模型并进行量化分析, 得出切削速度对切削力 F_x 的影响要比对切削力 F_y 和 F_z 大, 背吃刀量对切削力 F_z 的影响要比对切削力 F_x 和 F_y 大的结论, 并以材料去除率和切削力为评价指标对工艺参数进行优化, 得到用于生产加工的最佳工艺参数组合。

关键词: 金刚石圆锯片; 花岗石; 切削力; 正交实验

中图分类号: TG717

文献标志码: A

Experimental Study on Cutting Force and Parameter Optimization of Sawing Granite with Diamond Circular Saw

Zheng Chunying, Zhang Jinsheng, Wang Zhi, Zhang Zhengmei, Gao Sheng

Abstract: Based on the orthogonal experiment study of sawing granite with diamond circular saw. Through the range analysis the significance of cutting speed, feed rate and cutting depth affecting cutting force was studied. Then come to the result that cutting force decreases with the increase of cutting speed, and increases with the increase of the feed rate and depth of cut. Through the mathematical models of cutting force established by regression analysis, the quantitative relationship between cutting force and three factors were studied. Then concluded that the effect of cutting speed on cutting force F_x is larger than cutting force F_y and F_z . And the effect of cutting depth on cutting force F_z is larger than cutting force F_x and F_y . The optimum parameters that have guidance function for production have been obtained by optimized parameters taking into account the machining efficiency and cutting force.

Keywords: diamond circular saw; granite; cutting force; orthogonal experiment

1 引言

花岗石以其硬度高、耐磨损、耐腐蚀及稳定的物理化学性能广泛应用于建筑装饰、生活用具、精密机械、测量仪器与仪表等行业。随着花岗石制品需求量的与日俱增, 其质量档次要求也越来越高。目前, 在花岗石制品生产中广泛采用金刚石圆锯片进行锯解加工, 国内外的一些专家学者正通过研究金刚石圆锯片的锯解过程来降低花岗石的加工成本, 提高产品质量和生产效率。A. Ersoy 等对金刚石圆锯片锯解花岗石过程中刀具的磨损与结块强度的关系进行了研究^[1, 2]; Janusz Konstanty 对锯切加工过程中花岗石切屑的形成以及材料去除过程进行了理论分析^[3]; 也有研究者建立了金刚石圆锯片中的金刚石单颗粒磨削模型^[4]。

在锯解花岗石过程中, 切削力反映了金刚石圆锯片与花岗石之间的相互作用, 体现了材料去除机理、加工质量和刀具磨损状况等综合信息。本文对金刚石圆锯片的切削力与工艺参数之间的关系进行

实验研究和理论分析, 对工艺参数进行优化组合, 为花岗石的锯解理论和生产加工提供实验数据。

2 实验条件及设计

实验在数控加工中心 SPEED Y2000(意大利生产)上进行。工件材料选用五莲花花岗石, 其化学成分与物理性能见表 1; 锯解刀具采用金刚石圆锯片, 其刀头组分及结构尺寸见表 2。锯解过程中的切削力采用瑞士 Kistler 公司生产的防水性测力仪进行采集。图 1 为实验原理简图。首先将工件固定于传感器上, 在锯切过程中传感器把力的信号通过数据线传给电荷放大器, 然后通过数据采集卡传输到计算机进行显示和处理。

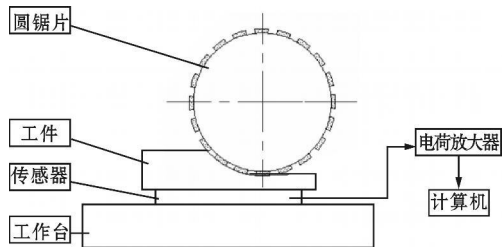


图 1 实验原理简图

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(Z2007F07); 山东省科技发展计划资助项目(2007GG10004008)
收稿日期: 2009 年 10 月

表 1 五莲花岗岩化学成分与物理性能

主要化学成分(%)					莫氏硬度	抗压强度 kg/cm ²	抗折强度 kg/cm ²	耐磨性 g/cm ²
SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO				
68.28	14.81	4.95	3.62	2.19	7.4级	1400—2400	130—140	0.6

表 2 刀具的几何参数和性能

刀具特性		刀具参数	
金属结合剂组成成分(%)		金刚石颗粒粒度(#) 刀具直径(mm) 节块数量 节块宽(mm) 节块长(mm)	45/ 50 210 24 3. 8 20.8
Co	62.40		
Cu	17.79		
C	14.09		
O	3.14		
Al	1.24		
Si	0.98		

实验中选取对加工过程影响最大的参数,即切削速度 V_s 、刀具进给速度 V_f 和背吃刀量 a_p 三个因素,且每个因素选取三个水平,如表 3 所示。在本实验中根据生产实际和相关领域研究成果^[3],同时考虑所用圆锯片的技术要求,切削速度选取 30m/s、40m/s 和 50m/s 三个水平,进给速度选取 350mm/min、400mm/min 和 450mm/min 三个水平,背吃刀量选取 10mm、15mm 和 20mm 三个水平。由以上选取的参数编制正交表,如表 4 所示。

表 3 三因素三水平

水平	因 素		
	(A)切削速度 (m/ s)	(B)进给速度 (mm/min)	(C)背吃刀量 (mm)
1	30	350	10
2	40	400	15
3	50	450	20

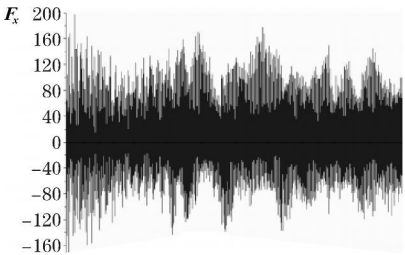
表 4 试验参数正交排列

实验号	切削速度 V_s (m/ s)	进给速度 V_f (mm/min)	背吃刀量 a_p (mm)
1	30	350	10
2	30	400	15
3	30	450	20
4	40	350	15
5	40	400	20
6	40	450	10
7	50	350	20
8	50	400	10
9	50	450	15

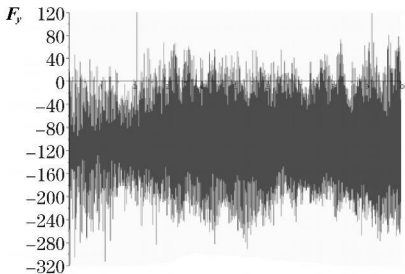
表 5 正交试验切削力结果

实验号	切削速度 v_s (m/ s)	进给速度 v_f (mm/min)	背吃刀量 a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	30	350	10	133	188	240
2	30	400	15	203	254	436
3	30	450	20	253	333	500
4	40	350	15	150	230	320
5	40	400	20	175	231	386
6	40	450	10	181	302	353
7	50	350	20	145	264	402
8	50	400	10	149	202	220
9	50	450	15	199	280	410

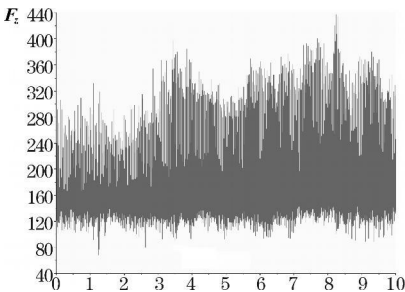
采集得到各切削力波形形状如图 2 所示,从图中可直观得出每一瞬时切削力数值并判断出工件所受切削力方向。



(a) 切削力 F_x 波形图



(b) 切削力 F_y 波形图



(c) 切削力 F_z 波形图

图 2 切削力波形图

3 实验结果及分析

实验测得的各切削力数值见表 5。

3.1 实验结果分析

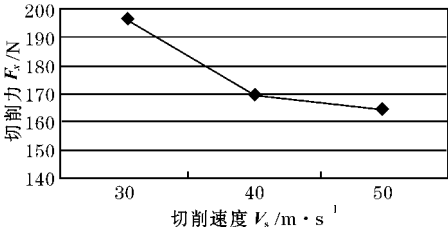
(1) 切削力极差分析

切削速度 V_s 、进给速度 V_f 和背吃刀量 a_p 三因

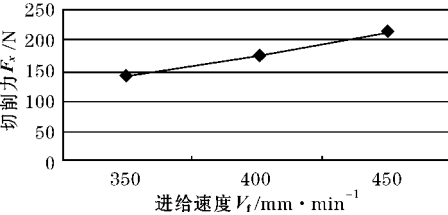
素水平对切削力 F_x 的影响趋势如图 3 所示,对切削力 F_x 的极差分别为 32、68 和 37,因此各因素对切削力 F_x 影响的主次关系为:进给速度→背吃刀量→切削速度。

切削速度 V_s 、进给速度 V_f 和背吃刀量 a_p 三因素水平对切削力 F_y 的影响趋势如图 4 所示,对切削力 F_y 的极差分别为 10、78 和 46,因此各因素对切削力 F_y 影响的主次关系为:进给速度→背吃刀量→切削速度。

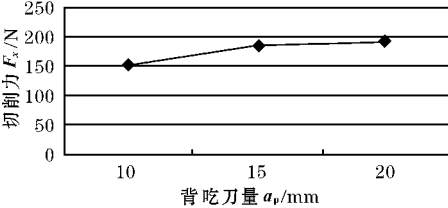
切削速度 V_s 、进给速度 V_f 和背吃刀量 a_p 三因素水平对切削力 F_z 的影响趋势如图 5 所示,对切削力 F_z 的极差分别为 48、100 和 158,因此各因素对切削力 F_z 影响的主次关系为:背吃刀量→进给速度→切削速度。



(a) 切削速度对切削力 F_x 的影响趋势

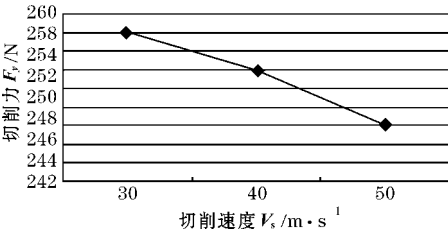


(b) 进给速度对切削力 F_x 的影响趋势

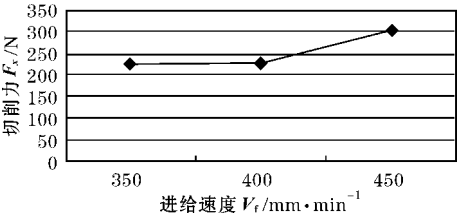


(c) 背吃刀量对切削力 F_x 的影响趋势

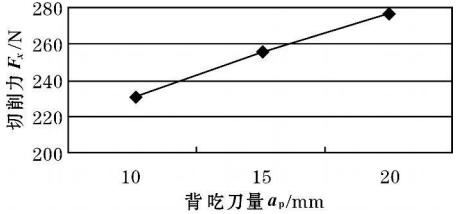
图 3 各因素水平对切削力 F_x 的影响趋势



(a) 切削速度对切削力 F_y 的影响趋势

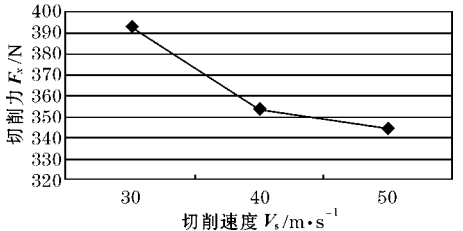


(b) 进给速度对切削力 F_y 的影响趋势

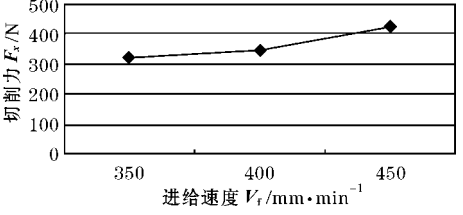


(c) 背吃刀量对切削力 F_y 的影响趋势

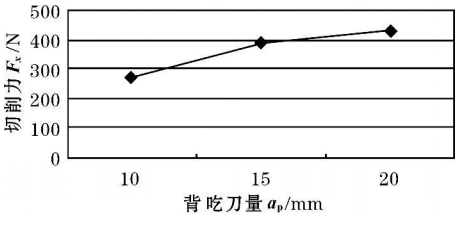
图 4 各因素水平对切削力 F_y 的影响趋势



(a) 切削速度对切削力 F_z 的影响趋势



(b) 进给速度对切削力 F_z 的影响趋势



(c) 背吃刀量对切削力 F_z 的影响趋势

图 5 各因素水平对切削力 F_z 的影响趋势

通过各因素对切削力的影响趋势分析,切削力随切削速度的增大而减小,其原因是随着切削速度的增加,单位时间内参与切削的金刚石颗粒数增加了,致使每个金刚石颗粒受到的切削力变小,导致切削力降低。随进给速度和背吃刀量的增大,切削力呈现增大趋势,其原因是进给速度增大,单位时间内去除的材料体积增大,间接导致每个金刚石颗粒受

到的切削力增大,因此切削力随进给速度的增大而递增。同样,随背吃刀量增大,圆锯片和工件的接触弧长面积增大,致使材料去除体积增大,需要的切削功增大,因此切削力随背吃刀量的增大而增大。

(2)切削力数学模型的建立

切削力数学模型的建立采用文献[6]中磨削力指数公式形式,即切削力 F_x 与切削速度 V_s 、进给速度 V_f 和背吃刀量 a_p 满足关系式为

$$F_x = k v_s^\alpha v_f^\beta a_p^\gamma$$

式中, k 为工件材料和切削条件对切削力的影响系数; α 、 β 、 γ 为切削用量对切削力的影响系数。

两边取对数得

$$\ln F_x = \ln k + \alpha \ln v_s + \beta \ln v_f + \gamma \ln a_p$$

若令 $\ln F_x = y$ 、 $\ln K = b_0$ 、 $\alpha = b_1$ 、 $\beta = b_2$ 、 $\gamma = b_3$ 、 $\ln v_s = x_1$ 、 $\ln v_f = x_2$ 、 $\ln a_p = x_3$, 则上式变为

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$$

把各因素数值和在上述实验条件下得到的切削力进行换算代入上式,运用 Matlab 进行回归分析得出系数 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 分别为 -3.5864 、 -0.3065 、 1.5199 、 0.2859 , 通过以上转换关系可得 $k = e^{-3.5864}$ 、 $\alpha = -0.3065$ 、 $\beta = 1.5199$ 、 $\gamma = 0.2859$, 因此得到切削力 F_x 的数学模型为

$$F_x = 0.0277 v_s^{-0.3065} v_f^{1.5199} a_p^{0.2859} (N) \tag{1}$$

同理得到切削力 F_y 、 F_z 的数学模型为

$$F_y = 0.115 v_s^{-0.0372} v_f^{1.1844} a_p^{0.2728} (N) \tag{2}$$

$$F_z = 0.1445 v_s^{-0.24} v_f^{1.1372} a_p^{0.7012} (N) \tag{3}$$

通过以上计算所得切削力数学模型可知: (a) 切削力与切削速度成反比, 即切削力随着切削速度的增大而减小。 (b) 切削力随着进给速度和背吃刀量的增大而增大。 (c) 由切削力模型可得出切削速度对切削力 F_x 的影响要比对切削力 F_y 、 F_z 的影响大, 这是因为切削力 F_x 主要由圆锯片高速旋转引起的振动和金刚石结块与工件的摩擦力组成的, 圆锯片转速越大引起的振动也越大, 因此对切削力 F_x 影响较大。 (d) 从各切削力数学模型还可得出, 背吃刀量对切削力 F_z 的影响要比对切削力 F_x 、 F_y 的影响大。根据所得数学模型, 在实际生产中可以根据给定加工参数来预测切削力。

(3)加工参数优化

通过以上各因素水平影响切削力趋势图可得出以下结论: 加工参数为 $A_3 B_1 C_1$ 时, 切削力最小, 但是此加工参数下材料去除率在九种组合中最低。由图 6 可见, 加工参数为 $A_1 B_3 C_3$ 时, 材料去除率最大, 同时由各因素水平影响切削力趋势图可见, 此加工参

数下切削力达到最大值, 必将导致剧烈的刀具磨损。通过以上分析可知: 最佳工艺参数的选择需要综合考虑各方面的因素。

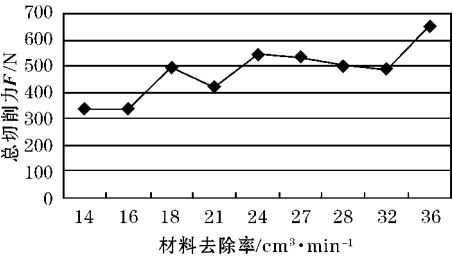


图 6 材料去除率与切削力大小趋势图

在理论上, 切削速度对加工效率是没有影响的, 但是通过切削速度对切削力 F_x 、 F_y 、 F_z 的影响趋势图可得出, 切削速度应该选择 A_3 。

通过进给速度对切削力 F_x 的影响趋势图 (见图 3) 可以看出, 进给速度对切削力的影响基本成线性, 通过进给速度对切削力 F_y 、 F_z 的影响趋势图 (见图 4、图 5) 可以看出, 进给速度与切削力的关系在 B_2 处发生转折, 而且 $B_2 B_3$ 的斜率要大于 $B_1 B_2$ 的斜率, 同时考虑加工效率, 因此进给速度应该选择 B_2 。

根据背吃刀量对切削力 F_x 和 F_z 的影响趋势图 (见图 3、图 5), 背吃刀量与切削力的关系在 C_2 处发生转折, 且 $C_2 C_3$ 的斜率略小于 $C_1 C_2$, 同时考虑加工效率, 因此背吃刀量应选择 C_3 。

经上述分析得出切削参数的最佳组合应为 $A_3 B_2 C_3$, 即切削速度为 50 m/s , 进给速度为 400 mm/min , 背吃刀量为 20 mm 。即在此切削参数下的切削效率为 $32 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。而 $A_3 B_2 C_3$ 这一组合并没有在 9 次试验中出现, 该结论正体现了正交实验的优点。

通过实验得出组合为 $A_3 B_2 C_3$ 时, 切削力 F_x 、 F_y 、 F_z 分别为 160 N 、 215 N 和 345 N , 总切削力 437 N , 证明此切削参数组合在当前加工条件下为最优。

4 结语

(1) 通过极差分析得到了切削力与各因素之间的变化趋势, 即切削力随切削速度的增大而减小, 随进给速度和背吃刀量的增大而增大, 同时得到了各因素水平对切削力影响的主次关系。

(2) 通过回归分析建立了切削力数学模型, 系统分析了花岗石锯解过程中各因素对切削力的量化影响。因此在实际生产中给定加工参数具体数值, 根据数学模型就可以预测切削力数值, 从而为合理选择刀具和工艺参数的制定以及实现花岗石高效加工奠定了理论基础。

钛合金切削加工中刀具寿命和刀具磨损的研究

秦龙, 董海, 张弘弢, 李嫒

大连理工大学

摘要: 钛合金是典型的难加工材料, 提高钛合金的加工效率和刀具寿命是急需解决的问题。本文选用 Ti-6Al-4V 作为工件材料, 选取两种不同的硬质合金和一种聚晶金刚石(PCD)作为刀具材料, 对切削加工中刀具寿命和刀具磨损进行了试验研究。研究结果表明: PCD 刀具寿命明显高于硬质合金刀具, 在高速下优势尤其明显; 两种硬质合金刀具低速下主要是粘结磨损, 高速下主要是粘结磨损、扩散磨损和氧化磨损; PCD 刀具主要是微崩刃和石墨化引起的沟槽磨损。

关键词: Ti-6Al-4V; 硬质合金刀具; PCD 刀具; 刀具寿命; 刀具磨损
中图分类号: TG506 文献标志码: A

Research on Tool Life and Wear in Cutting Titanium Alloy

Qin Long, Dong Hai, Zhang Hongtao, Li Man

Abstract: Titanium alloy is a typical alloy that's difficult to machine. Improvement of tool life and cutting efficiency is the key problem to be solved. In this paper, one PCD tool and two kinds of tungsten carbide tools were chosen on cutting Ti-6Al-4V. The life and wear of the three tools was analyzed. The results showed that, compared with the two tungsten carbide tools PCD tool had a longer life especially in high speed. The dominant wear mechanisms of the two tungsten carbide tools were adhesion in low speed and adhesion, diffusion, oxidation in high speed. Notch wear generated by graphitization and chipping were found to be the main wear mechanisms for PCD tool.

Keywords: Ti-6Al-4V; carbide tool; PCD tool; tool life; tool wear

1 引言

钛合金具有很高的高温强度、抗裂纹扩张能力和抗腐蚀能力等优良性能, 被广泛应用于航空航天、石油精炼、化工处理、外科移植手术、污染控制、核废物储存等领域^[1]。但是从加工性能的角度看, 钛合金是典型的难加工材料, 其导热性差、化学活性高、弹性模量小、加工硬化严重。钛合金加工的切削速度低、刀具寿命短^[2], 如何提高钛合金的加工速度和

加工效率是亟待解决的问题。国内外对钛合金加工的研究主要集中在刀具材料、刀具几何角度、冷却润滑液的应用等方面, 目前很少有人对钛合金加工中刀具寿命和刀具磨损机理进行深入研究^[2-4]。本文选用钛合金 Ti-6Al-4V 作为工件材料, 选用国内加工钛合金最常用的硬质合金 YD15 和新型硬质合金 YM201 及 PCD 作为刀具材料, 通过钛合金干切削试验, 对比分析三种刀具的寿命, 并对三种刀具的磨损形态和磨损机理进行深入研究。

(3)以材料去除率和切削力为评价指标, 进行了参数优化, 得到基于正交实验的最优参数组合为 A₃B₂C₃。

参考文献

[1] A Ersoy, S Buyuksagic, U Atici. Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different bard abrasive rocks [J]. Wear, 2005, 258: 1422- 1436.
[2] U Atici, A Ersoy. Correlation of specific energy of cutting saws and drilling bits with rock brittleness and destruction energy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 2602- 2612.
[3] Janusz Konstanty. Theoretical analysis of stone sawing with dia-

mond[J]. Journal of Materials Processing Technology. 2002, 123: 146- 154.
[4] Antoniomaria Di Ilio, Antonio Togna. A theoretical wear model for diamond tools in stone cutting[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43: 1171- 1177.
[5] 林辉, 李湘祁. 金刚石圆锯片锯切用量的研究[J]. 石材, 2008(5): 12- 16.
[6] 李伯民, 赵波. 现代磨削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 41- 44.
第一作者: 郑春英, 山东大学机械工程学院 250061 济南市
First Author: Zheng Chunying, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China