

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2015.04.011

# 金刚石圆锯片锯切过程能效分析

张美琴<sup>1</sup>, 贾敏忠<sup>2</sup>, 黄国钦<sup>3</sup>

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)  
3. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 通过监测系列锯切试验的主轴功率, 分析锯切过程空载功率、有效锯切功率的变化规律, 并结合材料去除率进行分析。结果表明, 空载功率随锯切线速度增大基本呈线性增大。有效锯切功率随材料去除率呈近似线性增大。能效系数随材料去除率增大而增大, 去除单位体积材料总能耗系数随材料去除率增大呈先快速后缓慢的减小趋势。总体来讲, 高线速度锯切工艺直接增加空载功率, 并不节能, 适当提高材料去除率有利于低能耗加工。

**关键词:** 金刚石圆锯片; 锯切; 功率; 能效

**中图分类号:** TG580.6; TG74 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2015)04-0357-05

## Analysis of energy efficiency in diamond circular sawing

Zhang Meiqin<sup>1</sup>, Jia Minzhong<sup>2</sup>, Huang Guoqin<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, China;  
2. College of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;  
3. Institution of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Experiments of sawing granite with diamond circular blades were conducted to study the energy efficiency of circular sawing. In sawing, the power consumed by machine spindle can be classified into idle power and active sawing power. The idle power increased linearly with the increase of the linear sawing speed of the blade. The active sawing power increased nearly linearly with the increase of material removing rate. The energy efficiency coefficient increased with the increase of the material removing rate, but the overall energy consumption coefficient of removing per unit volume materials decreased quickly at first and then gradually slowed down. The results indicate that the high linear speed sawing improves idle power but does not lower energy consumption, that raising the material removing rate in a proper manner is conducive to low power processing.

**Keywords:** diamond circular blade; sawing; power; energy efficiency

金刚石圆锯片锯切作为一种高效加工方式, 在石材加工中起分离与成形切割作用, 其加工量在石材从矿山到成品的加工流程中占据主导地位(高达70%), 直接决定石材加工效率、成本与能耗<sup>[1]</sup>。功率是衡量能量消耗的一个关键指标。

对圆锯片锯切而言, 其工作时主轴功率消耗可以分为空载功率和有效锯切功率(前者是锯片空载旋转即无切割时的功率消耗, 后者是直接消耗于锯除材料的功率)。以往很多研究主要针对有效锯切功率展开, 用于揭示锯切机理, 很少涉及空载

收稿日期: 2015-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175194); 厦门市科技计划指导性项目(3502Z20077003); 福建工程学院科研发展基金预研项目(GY-Z13015); 泉州市科技计划项目(2013Z15)

第一作者简介: 张美琴(1983-), 女, 福建莆田人, 实验师, 硕士, 研究方向: 实验教学及硬脆材料加工技术。

功率在锯切能耗中的影响<sup>[1-6]</sup>。随着节能减排意识的不断深入和高速超高速锯切工艺的开发<sup>[5]</sup>,如何对待锯切过程空载功率消耗值得考虑。本文通过系列锯切试验,分析了锯切过程空载功率、有效锯切功率等随材料去除率的变化规律,旨在为低能耗加工工艺优选提供依据。

## 1 实验条件

锯切实验在 HPS-1 高性能锯切机上进行,采用顺切模式。主轴功率( $P$ )实时消耗采用 GX3 功率仪监测,采用 DEWE2010 信号数据采集系统进行功率信号采集和分析(采用频率设置为 1 kHz),测试系统原理图如图 1 所示。锯切实验所用的 3 种金刚石圆锯片的主要技术参数如表 1 所示。

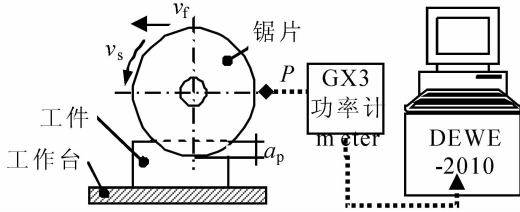


图 1 锯切及功率测试系统示意

Fig. 1 Sketch of sawing and power testing system

试验所用锯切参数组合(线速度  $v_s$ , 锯切深度  $a_p$  和工作台进给速度  $v_w$ )如表 2 所示。每组锯切参数组合重复 5 次后取平均值。

表 1 锯片主要技术参数

Tab. 1 The main technical parameters of sawing blade

编号	锯片直径/mm	结块尺寸( $L \times H \times W$ )/ mm × mm × mm	磨粒	
			粒径/ $\mu\text{m}$	浓度/%
B1		40 × 10 × 2.6		
B2	610	40 × 10 × 2.6	425 ~ 500	30
B3		40 × 10 × 4.0		

表 2 试验所用锯切参数组合

Tab. 2 Sawing parameters set

锯片	$v_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_f / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$a_p / \text{mm}$
B1	30, 50, 70		5, 10, 15,
B2, B3	30	2, 4, 6	20, 25, 30

## 2 实验结果

图 2 是一条典型完整锯切过程主轴功率消耗信号曲线。从图上可以看出,基于锯片与工件的

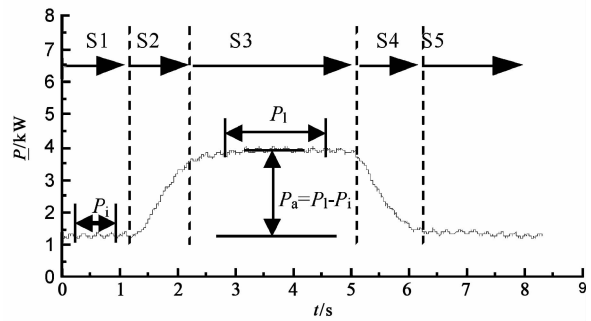


图 2 典型锯切过程主轴功率曲线

Fig. 2 A typical power curve of the main spindle during sawing

相对运动位置<sup>[7]</sup>, 主轴功率曲线可以分为 5 个阶段: S1—空载阶段(锯片旋转但不切割), 对应的功率即为空载功率( $P_i$ ), S2—切入过渡阶段(锯片开始慢慢切入工件, 主轴功率慢慢增加), S3—稳定锯切阶段(锯片完全切入工件, 主轴功率处于相对稳定状态), 对应的主轴功率称为总功率( $P_1$ ), S4—切出过渡阶段(锯片开始慢慢切出工件, 功率逐渐减小), S5—空载(锯片完全切出工件后, 又进入空载阶段, 等同于 S1 阶段)<sup>[4]</sup>。不难看出, 用于锯切工件材料的功率净消耗即有效锯切功率( $P_a$ )可按式(1)获得。

$$P_a = P_1 - P_i \quad (1)$$

图 3 是 B1 锯片在不同线速度下的空载功率随锯切线速度的变化趋势。可以看出, 空载功率消耗随着线速度的增大而增大。空载时尽管存在锯片与空气、冷却水间的冲击和摩擦损耗, 但功率主要消耗于电机损耗, 所以空载功率与锯片线速度具有很好的线性对应关系。

单位宽度材料去除率是衡量锯切加工效率的一个关键指标, 可由式(2)获得。

$$Q = v_f \cdot q_p \quad (2)$$

图 4 是 B1 锯片加工时锯切总功率随单位宽度材料去除率的变化关系。可以看出在同一线速度下, 锯切总功率是随着单位宽度材料去除率的增大而增大。对于同一单位宽度材料去除率, 锯切总功率是随着线速度的增大而增大。

## 3 分析与讨论

锯切总功率是由空载功率和有效锯切功率组成<sup>[7]</sup>。空载功率主要消耗于电机空载损耗和锯片与空气、冷却液的摩擦与冲击损耗, 是无法避免

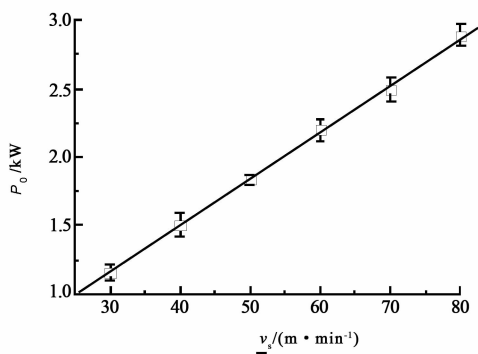


图3 不同线速度  $v_s$  下 B1 锯片的空载功率  $P_0$   
 Fig. 3 Idle power  $P_0$  of blade B1 under different sawing speeds

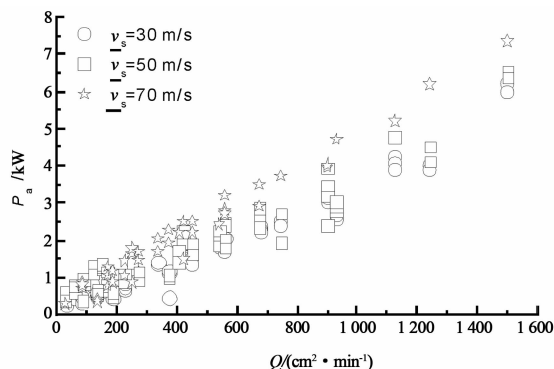


图5 有效锯切功率  $P_a$  与单位宽度材料去除率  $Q$  的关系  
 Fig. 5 Active sawing power  $P_a$  vs the materials removal rate  $Q$  of per unit width of blade

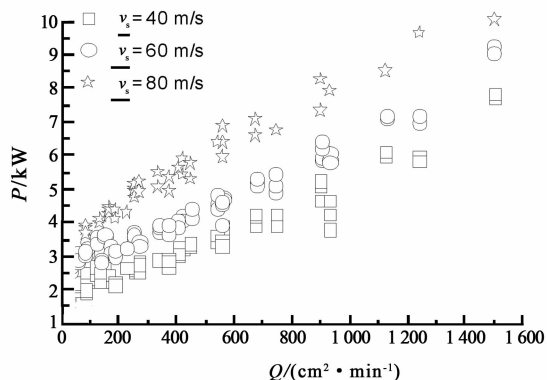


图4 B1 锯切总功率  $P$  与单位宽度材料去除率  $Q$  的关系  
 Fig. 4 Total sawing power  $P$  vs the materials removal rate  $Q$  of per unit width of blade

的,图3表明其与锯切线速度呈线性正相关,因此采用高速、超高速锯切必然导致空载能量损耗增大。图5是图4所示锯切总功率扣除空载功率后所得有效锯切功率随单位宽度材料去除率的变化趋势。显然,随着单位宽度材料去除率增大,有效锯切功率随之几乎呈线性增大,这是去除材料消耗能量导致的<sup>[8]</sup>。从图上还可以看出,在相同材料去除率下,增大线速度会导致有效锯切功率增大。这应该与材料去除方式发生变化有关。对于脆性材料而言,材料以大块体积破碎的脆性断裂方式去除时消耗能量更少。在相同单位材料去除率下,提高线速度直接减小锯切弧区内单颗磨粒切削深度,导致大块体积破碎比例减小,因而能量消耗增加。

为了分析空载功率对锯切总功率的影响,定义有效锯切功率与锯切总功率的比值为能效系数

( $e_c$ ),见式(3)。定义锯切总功率与材料去除率的比值为去除单位材料总能耗( $e_c$ ),见式(4)。

$$e_c = P_a/P_1 \tag{3}$$

$$e_c = \frac{P_1}{Q \cdot B} = \frac{P_i + P_a}{Q \cdot B} = \frac{P_i}{Q \cdot B} + u \tag{4}$$

式中, $B$ 为锯片宽度; $u$ 为锯切比能,是有效锯切功率与材料去除率的比值,指真正消耗去除单位体积材料的能量<sup>[8]</sup>。

图6是B1锯片在不同线速度锯切下的能效系数随单位宽度材料去除率的变化趋势。在相同线速度下能效系数随着单位宽度材料去除率的增

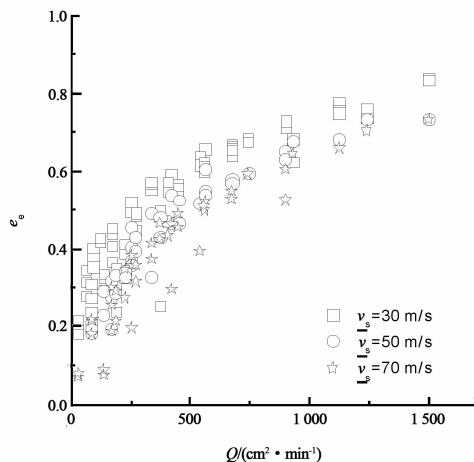


图6 能效系数  $e_c$  随单位宽度材料去除率  $Q$  的变化趋势  
 Fig. 6 Energy efficiency coefficient  $e_c$  vs the materials removal rate of per unit width of blade  $Q$

大而增大。由于锯切空载功率不随材料去除率变化,增大材料去除率意味着消耗相同空载功率可以

去除更多的材料,所以能效系数增大。从图上还可以看出,线速度越低,锯切能效系数越高。可见,从能耗角度看,高速、超高速锯切工艺并不节能。

图 7 是去除单位材料总能耗和锯切比能随单位宽度材料去除率的变化趋势。从图上可以看出,随着材料去除率的增大,这两个系数都随之呈先快速后趋缓的减小趋势。随着材料去除率的增大,一方面,脆性材料更倾向于以消耗能量较低的体积破碎方式去除;另一方面,空载功率损耗得到更多去除材料的分摊。因此总体上,去除等体积材料时,增大材料去除率不仅能效比更高,且更为节能。

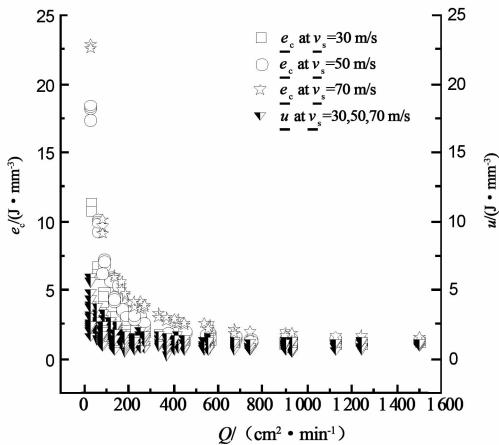


图 7 去除单位材料总能耗  $e_c$  和锯切比能  $u$  随单位宽度材料去除率  $Q$  的变化趋势 (B1 锯片)

Fig. 7 Total energy consumption in removing per volume materials  $e_c$  and the specific energy  $u$  vs the materials removal rate of per unit width of blade  $Q$  for blade B1

图 8 是锯片 B1、B2 和 B3 在线速度 30 m/s 时的去除单位材料总能耗  $e_c$  随单位宽度材料去除率的变化规律。从图上看出,不同锯片所对应的去除单位材料总能耗随单位宽度材料去除率的变化趋势几乎重合,也即不同锯切条件下的  $e_c - Q$  关系相对比较固定。这为低能耗加工参数提供了

很好的参照依据。从图 8 可以看出,要实现低能耗加工,锯片单位材料去除率要选 200  $\text{cm}^2/\text{min}$  以上,但是单位材料去除率大于 800  $\text{cm}^2/\text{min}$  后提高材料去除率对节能贡献已经不大,同时过大的材料去除率会导致锯片受力过大而弯曲、断齿、磨损过快等问题,因此材料去除率也不能无限制增大。

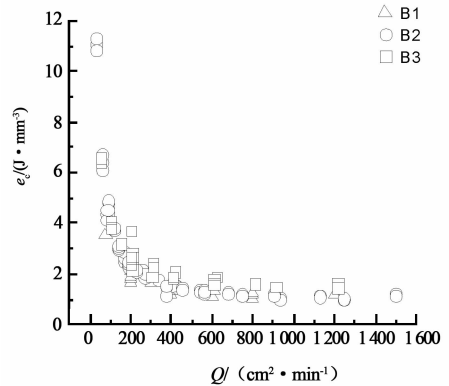


图 8 去除单位材料总能耗  $e_c$  随单位宽度材料去除率的变化趋势 (B1、B2 和 B3 锯片,线速度 30 m/s)

Fig. 8 Total energy consumption in removing per volume materials  $e_c$  vs the materials removal rate of per unit width of blade  $Q$  for blades (B1, B2 and B3 with a linear sawing speed of 30 m/s)

## 4 结语

金刚石圆锯片锯切过程主轴功率可以分为空载功率和有效锯切功率。空载功率在锯切过程无法避免,且随着锯切线速度的增大而增大。有效锯切功率随着材料去除率的增大而增大。随着材料去除率的增大,锯切能效系数随之增大而去除单位体积材料总功率随之减小。高速超高速锯切直接增大空载功率,导致能量利用率降低。提高材料去除率有利于降低去除单位体积材料的总能耗,提高能效系数。在去除相同体积材料时,适当提高材料去除率有利于节能加工。

## 参考文献:

- [1] Tumac D. Predicting the performance of large diameter circular saws based on Schmidt hammer and other properties for some Turkish carbonate rocks[J]. Int J of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 75: 159 - 168.
- [2] Careddu N, Marras G. Marble processing for future uses of  $\text{CaCO}_3$ -microfine dust: A study on wearing out of tools and consumable materials in stoneworking factories [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2015, 36 (3): 183 - 191.

- [3] 徐西鹏. 岩石材料的金刚石锯切研究进展[J]. 机械工程学报, 2003, 39(9): 17-22.
- [4] 黄国钦, 徐西鹏. 基于锯切弧区切向力分布的功率消耗模型[J]. 机械工程学报, 2011, 47(21): 170-176.
- [5] 黄国钦, 黄辉, 郭桦, 等. 串珠绳锯切花岗石过程中锯切参数对锯切力和能耗的影响[J]. 机械工程学报, 2009, 45: 234-239.
- [6] Denkena B. Development of advanced tools for economic and ecological grinding of granite[J]. Key Engineering Materials, 2003, 250: 21-32.
- [7] 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.
- [8] Xu X P. Forces and energy in circular sawing and grinding of granite[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(1): 13-22.

(责任编辑: 陈雯)

(上接第 333 页)

综上, 海峡两岸之间在土木工程专业用语的术语中, 还是存在一定的差异。后续研究确有必要深入探究如何将两岸土木专业术语进行整理与对照, 使两岸在不同社会时代的语言能够互换互导, 以便在这多变的未来间发挥其重要性, 为两岸的交流、发展带来更多的契机。

### 3 结语

在大土木的环境下, 具有混淆程度的专业术语占 27%, 显示两岸土木工程人员可能在大土木环境的沟通上约有 1/4 的专业术语可能会被混淆

或误解。此外, 在上述的 27% 中, 交通工程专业术语就占了 19%, 其它专业领域占约 8% 左右, 显示交通工程专业术语最容易混淆不清。

随着两岸交流越来越广泛, 关系趋向越来越亲密, 特别是沿海省份相对于其他省份更为密切, 两岸土木专业术语应有一相互参照的准则。学术术语是各个专业领域的学术价值, 两岸在不同专业领域的专业学术用法有必要相互参照了解。学术术语翻译是海峡两岸沟通的桥梁, 会加速两岸之间基础建设的发展与交流, 促进双方在学术、教育、文化等有个良性的发展。

### 参考文献:

- [1] 费锦昌. 海峡两岸现行汉字字形的比较分析[J]. 语言文字应用, 1993(1): 39-50.
- [2] 肖甫春. 汉字改革趋向新探(之一)[J]. 大庆高等专科学校学报, 2001(1): 53-58.
- [3] 龚嘉镇. 两岸用字的异同与 21 世纪的“书同文”[J]. 中国文字研究, 2004(5): 83-88.
- [4] 徐宁. 海峡两岸字体字形差异研究——以宋体与楷体为例[J]. 乐山师范学院学报, 2012(10): 36-46.
- [5] 邓章应, 黄艳萍. 台湾《手写行书范本》中的简体字研究——兼与大陆简化字比较[J]. 台湾研究, 2012(4): 55-59.
- [6] 魏励. 《简明海峡两岸对比词典》的编写问题[C]//语言文字应用研究论文集(II). 北京: 教育部语言文字研究所, 2004.
- [7] 徐云娜. 汉字简繁之争的网络舆情研究[D]. 保定: 河北大学, 2009.
- [8] 熊南京. 二战后台湾语言政策研究(1945-2006)[D]. 北京: 中央民族大学, 2007.
- [9] 张岚. 海峡两岸现代汉语通用语语音差异对比研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- [10] 包恒新. 读《台湾语典》话两岸语缘[C]//海峡两岸五缘论——海峡两岸五缘关系学术研讨会论文集. 北京: 方志出版社, 2003.
- [11] 徐红进. 最新两岸用语差异对照手册[M]. 台北: 灵活文化, 2009.
- [12] 范冰辉, 黄正瀚, 高志翰. 海峡两岸土木工程科技术语对照基础研究[J]. 中国科技术语, 2013(5): 22-25.

(责任编辑: 陈雯)