

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.10.006

# 基于旋转超声的瓷砖磨边磨削力研究\*

黎志国<sup>1,2</sup>, 张永俊<sup>1,2\*</sup>, 姚震<sup>1,2</sup>, 刘桂贤<sup>1,2</sup>, 郭刚<sup>1,2</sup>, 刘军<sup>2,3</sup>

(1. 广东工业大学机电工程学院, 广东广州 510006; 2. 广州市非传统制造技术及装备重点实验室, 广东广州 510006; 3. 广东工业大学材料与能源学院, 广东广州 510006)

**摘要:**针对传统瓷砖磨边中存在的工具损耗大、崩边严重,以及磨盘端面与工件平行时易对已加工表面造成二次破坏的问题,提出了一种磨盘端面与工件呈一定磨削角度的旋转超声磨边加工方法。利用搭建的旋转超声磨边试验装置和 Kistler 测力仪,对瓷砖与磨盘在不同磨削角与磨削高度时的磨削力变化情况进行了单因素试验研究,并用正交试验法研究了磨削角、磨削高度等试验变量对磨削力的影响程度。研究表明:磨削角对磨削力影响小,磨削高度对径向磨削力影响最为明显,各因素对磨削力的影响程度从大到小依次为进给速度、磨削深度、磨削高度、主轴转速、超声电流和磨削角。

**关键词:**旋转超声磨边;瓷砖;磨削力;磨削角;磨削高度

中图分类号:TH16;TG580.6

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)10-1039-06

## Grinding force of tile edge based on rotary ultrasonic

LI Zhi-guo<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-jun<sup>1,2</sup>, YAO Zhen<sup>1,2</sup>,  
LIU Gui-xian<sup>1,2</sup>, GUO Gang<sup>1,2</sup>, LIU Jun<sup>2,3</sup>

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;  
2. Guangzhou key Laboratory of Nontraditional Machining and Equipment, Guangzhou 510006, China;  
3. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of large tool loss and serious chipping in the traditional ceramic tile edge grinding, and the secondary damage to the machined surface caused by the end face of the grinding disc paralleled with the workpiece, a rotary ultrasonic edging method for grinding the end face of the disc and the workpiece at a certain grinding angle was proposed. The single-factor experimental study on the variation of the grinding force of the ceramic tile and the grinding disc at different grinding angles and grinding heights was carried out by using the rotating ultrasonic edging tester and Kistler dynamometer. The influence of the grinding angle, grinding height and other test variables on the grinding force were investigated by orthogonal test. The results indicate that the grinding angle has little effect on the grinding force, and the grinding height has the most obvious influence on the radial grinding force. The order of influence of each factor on the grinding force from big to small are the feed rate, the grinding depth, the grinding height, the spindle speed, the ultrasonic current and the grinding angle.

**Key words:** edge grinding based on rotary ultrasonic; tile; grinding force; grinding angle; grinding height

收稿日期:2019-03-06

基金项目:广东省科技计划资助项目(2016A010102017;2017A010102010)

作者简介:黎志国(1994-),男,广东佛山人,硕士研究生,主要从事旋转超声加工及装备开发方面的研究。E-mail:554791283@qq.com

通信联系人:张永俊,男,教授,博士生导师。E-mail:yjzhang@gdut.edu.cn

## 0 引言

在硬脆材料加工中,传统加工方法包括切削、铣削、磨削和钻孔等,非传统加工方法包括电解、电火花、超声加工和磨料水射流等<sup>[1]</sup>。

旋转超声磨削是超声加工与传统磨削加工相结合的复合加工方法,特别适用于硬脆材料加工,具有工件磨削力小、磨削热低和加工质量高等优点<sup>[2]</sup>。国内外学者对旋转超声加工工艺开展了大量的研究。NING F<sup>[3]</sup>和 WANG H<sup>[4]</sup>等使用旋转超声技术磨削碳纤维增强塑料(CFRP),发现了进给方向的磨削力随着主轴转速、超声振幅和磨粒的增大而减小,随着进给速度、磨削深度和磨料浓度增大而增大;英国的声音切割公司研制了一种超声波瓷砖切割机,确保快速切割瓷砖时不会造成破碎<sup>[5]</sup>;ZHANG Cheng-long 等<sup>[6]</sup>使用面磨削 K9 光学玻璃,发现了旋转超声磨削可以减小磨削力、刀具磨损和工件亚表面损伤深度;张娇<sup>[7]</sup>和唐岳<sup>[8]</sup>研究了旋转超声磨削中主轴转速、进给速度、磨削深度对瓷砖加工过程中磨削力、磨削温度、崩边面积、表面粗糙度的影响规律,发现了超声辅助加工能一定程度减小加工过程中瓷砖的受力情况、磨削温度和崩边面积。

实际生产中,通过工艺特性设计和搭建旋转超声瓷砖磨边装置,能在不同磨盘高度下加工瓷砖。研究磨削力有助于优化加工参数。可以采用单因素试验法与正交试验法来研究工具磨盘与瓷砖端面的磨削角与相对磨削高度,探究在传统磨削加工与旋转超声磨削对磨削力的影响。

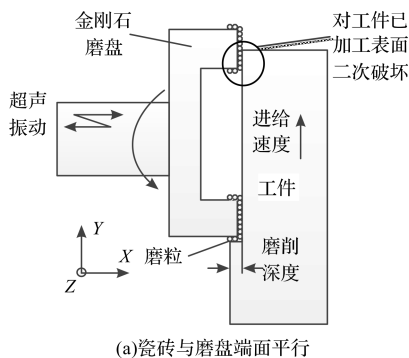
针对传统瓷砖磨边中存在的工具损耗大、崩边严重,以及磨盘端面与工件平行时,磨盘端面容易对已加工表面造成二次破坏的技术问题,本文将提出一种磨盘端面与工件呈一定磨削角度的旋转超声磨边加工方法。

## 1 旋转超声瓷砖磨边工艺原理

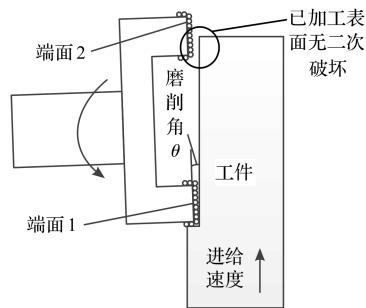
旋转超声瓷砖磨边结合了旋转磨边与超声高频锤击作用去除材料的特点,可以降低加工过程中的磨削力,减小工具磨损,实现高效率、高表面质量的磨边加工。

瓷砖与磨盘端面平行图、瓷砖与磨盘端面的磨削夹角如图 1 所示。

由于主轴旋转跳动及磨料镀层不均,当瓷砖与磨盘端面平行时,磨盘端面容易对已加工表面造成



(a) 瓷砖与磨盘端面平行



(b) 瓷砖与磨盘端面具有磨削夹角

图 1 旋转超声瓷砖磨边工艺原理

二次破坏,不利于加工表面质量。为了解决上述问题,本文提出了一种磨盘端面与工件呈一定磨削角度的旋转超声磨边加工方法,当磨盘端面 1 对瓷砖材料进行磨削加工时,磨盘端面 2 不会对已加工面造成二次破坏。

传统磨边与旋转超声磨边的崩边情况如图 2 所示。

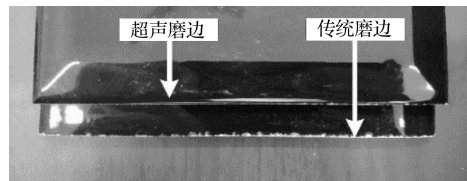


图 2 传统磨边与旋转超声磨边的崩边情况

在相同加工条件(主轴转速  $n = 1\ 420\ \text{r/min}$ ,进给速度  $f = 20\ \text{mm/s}$ ,磨削深度  $a_p = 0.3\ \text{mm}$ ,超声振子电流  $I = 2\ \text{A}$ )下,旋转超声磨边可以减小 9% 的瓷砖崩边量。

## 2 试验装置与条件

根据旋转超声磨边工艺特点,本文设计了旋转超声磨边试验装置,如图 3 所示。

旋转超声主轴为核心零部件,内置有感应式超声振子,其谐振频率为 19.7 kHz。变频调速电机通过联轴器,把转矩传入旋转主轴,工具头最终产生旋转与高频振动的复合运动。

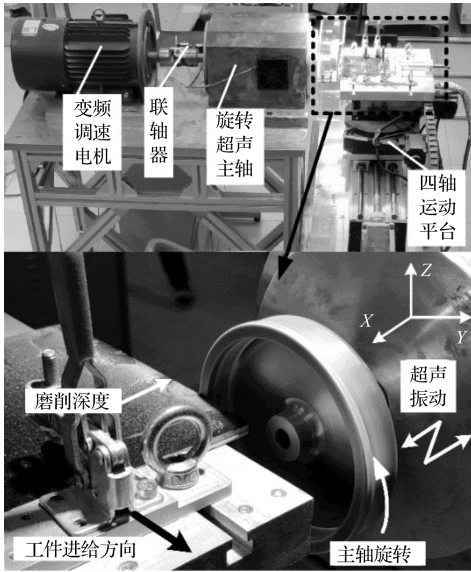


图 3 旋转超声磨边试验装置

延笛卡尔坐标系  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴分别为试验装置的轴向、进给方向和径向。四轴运动测力平台用于固定和控制工件运动,可实现延坐标系  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的直线运动,和绕  $Z$  轴的旋转运动。分别控制磨削深度、工件进给、相对加工高度和磨削角。Kistler 测力仪和 DynoWare 软件可以实时采集和记录瓷砖  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  这 3 个方向所受的磨削力。

磨盘和瓷砖性能如表 1 所示。

表 1 磨盘和瓷砖性能

性能参数	性能值
磨盘金刚石目数/目	50
磨盘超声谐振频率/kHz	19.7
瓷砖破坏强度/N	1 094.1
断裂模数/MPa	21.2

### 3 磨削力试验设计

#### 3.1 单因素试验设计

在磨边时,工件与磨盘端面呈一定磨削角可以防止已加工面的二次破坏,本文在不同磨削角情况下进行单因素试验,探究磨削角大小对传统旋转磨边和旋转超声磨边的磨削力的影响规律。

磨削相对高度变化示意图如图 4 所示。

瓷砖磨边生产线中,大部分瓷砖在磨盘中部磨削(图 3 中  $h_3$  位置);也有小部分生产线工件在磨盘端面底部磨削( $h_1$  位置)。本文设计的磨削高度单因素试验,主要探究工件与磨盘相对磨削高度对传统旋转磨边和旋转超声磨边的磨削力影响规律。

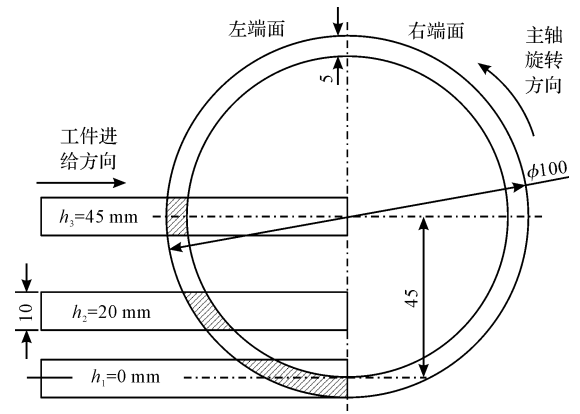


图 4 磨削相对高度变化示意图

电镀金刚石磨盘端面外径为 100 mm,厚度为 5 mm,瓷砖厚度为 10 mm 时,从磨盘底部到中部位置距离为 45 mm,把磨盘端面底部位置定义为  $h_1 = 0$  mm,端面中部位置定义为  $h_3 = 45$  mm。

磨削力试验变量如表 2 所示。

表 2 磨削力试验变量

试验号	磨削深度	磨削角	磨削高度	超声电流
1	0.4	0;0.07;0.13; 0.19;0.25	45	0;2
2	0.2	0	0;5;15;25; 35;45	0;2

综合实际生产情况,本文设计了单因素试验,研究了磨削角和磨削高度变化时,传统磨边和旋转超声磨边磨削力变化情况。磨削参数根据生产线技术指标取值,单因素试验中固定参数有:主轴转速  $n = 1\ 500$  r/min,进给速度  $f = 15$  mm/s。

#### 3.2 正交试验设计

通过单因素试验可以分别得到磨削角和磨削高度对磨削力的影响趋势,但无法确定磨削角和磨削高度对磨削力的影响程度。正交试验是根据因子设计公式的原理,采用组合式理论推导得到排列整齐的正交表,对试验进行整体设计、统计分析、综合比较的试验方法<sup>[9-10]</sup>。本文使用了极差分析和方差分析方法,分析了主轴转速、进给速度、磨削深度、磨削角、磨削高度及超声电流对磨削力的影响程度。

由于共有 6 个试验因素,且各因素间没有交互作用,只需选择因素大于等于 6 的正交表,本文选择六因素五水平正交表。

正交因素水平如表 3 所示。

表 3 正交因素水平

水平	主轴转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	磨削深度 $a_p/\text{mm}$	磨削角 $\theta/(\text{°})$	磨削高度 $h/\text{mm}$	超声电流 $I/\text{A}$
1	800	25	0.1	0	0	0
2	1 200	20	0.2	0.13	11	0.5
3	1 600	15	0.3	0.19	22	1
4	2 000	10	0.4	0.25	33	1.5
5	2 400	5	0.5	0.32	45	2

因素水平值需选择有代表性的水平组合进行试验,一般按照从小到大排列。根据磨削力变化趋势<sup>[11]</sup>,磨削力随进给速度与磨削深度的增大而增大,随主轴转速增大而减小。当主轴转速、进给速度和磨削深度的水平值均按从小到大大排列时,会出现主轴转速小,进给速度与磨削深度大的情况,此时预计磨削力较大,容易使磨盘损坏。因素水平取值时,把进给速度的水平值按倒序排列。

### 4 单因素试验磨削力分析

#### 4.1 磨削角对磨削力的影响

磨削角对磨削力的影响如图 5 所示。

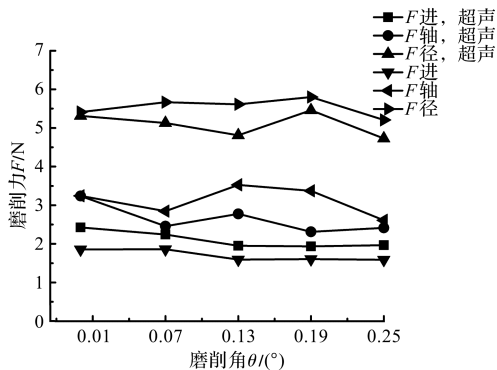


图 5 磨削角对磨削力的影响

3 个方向力中,径向力最大,轴向力次之,进给方向力最小,这是由于材料去除过程中径向剪切力起主要作用,轴向挤压力次之,进给剪切力几乎不起作用。试验数据表明:磨削角对磨削力的影响不大,且 3 个方

向的旋转超声磨削力均低于对应的传统磨削力。

#### 4.2 磨削相对高度对磨削力的影响

瓷砖磨削高度对磨削力的影响如图 6 所示。

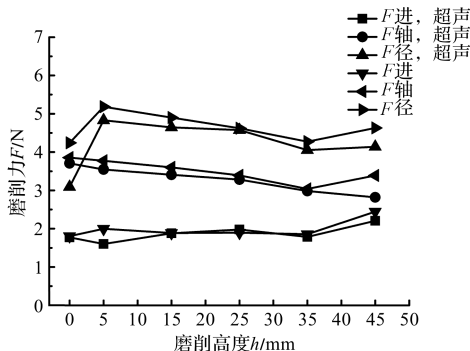


图 6 瓷砖磨削高度对磨削力的影响

试验结果表明:磨削高度对径向磨削力影响最为明显,磨削高度  $h = 0$  时,径向力较小,轴向力较大。这是由于此时磨盘旋转产生的自上而下的径向剪切力难以发挥作用,需通过增大轴向挤压力去除工件材料。

旋转超声磨削的径向力和轴向力均小于对应的传统磨削力,当在磨削高度  $h = 0$  时,旋转超声磨削的径向力比传统磨削减小 27%,这是因为工具头超声振动对加工面的高频锤击作用随接触面积增大而增大。

### 5 正交试验磨削力分析

#### 5.1 试验结果

把因素水平表数值代入试验计划表中即可得到试验方案,正交试验方案与试验结果如表 4 所示。

表 4 正交试验方案与试验结果

试验号	主轴转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	磨削深度 $a_p/\text{mm}$	磨削角 $\theta/(\text{°})$	磨削高度 $h/\text{mm}$	超声电流 $I/\text{A}$	总磨削力 $F/\text{N}$
1	800	25	0.1	0	0	0	11.39
2	800	20	0.2	0.13	11	0.5	6.68
3	800	15	0.3	0.19	22	1	6.45
4	800	10	0.4	0.25	33	1.5	4.75
5	800	5	0.5	0.32	45	2	9.37
6	1 200	25	0.2	0.19	33	2	12.47
7	1 200	20	0.3	0.25	45	0	8.13
8	1 200	15	0.4	0.32	0	0.5	6.17
9	1 200	10	0.5	0	11	1	5.57

续表 4 正交试验方案与试验结果

试验号	主轴转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	磨削深度 $a_p/\text{mm}$	磨削角 $\theta/(\circ)$	磨削高度 $h/\text{mm}$	超声电流 $I/\text{A}$	总磨削力 $F/\text{N}$
10	1 200	5	0.1	0.13	22	1.5	3.69
11	1 600	25	0.3	0.32	11	1.5	12.98
12	1 600	20	0.4	0	22	2	7.21
13	1 600	15	0.5	0.13	33	0	6.15
14	1 600	10	0.1	0.19	45	0.5	3.01
15	1 600	5	0.2	0.25	0	1	3.39
16	2 000	25	0.4	0.13	45	1	13.81
17	2 000	20	0.5	0.19	0	1.5	6.68
18	2 000	15	0.1	0.25	11	2	4.16
19	2 000	10	0.2	0.32	22	0	3.24
20	2 000	5	0.3	0	33	0.5	5.86
21	2 400	25	0.5	0.25	22	0.5	13.42
22	2 400	20	0.1	0.32	33	1	5.46
23	2 400	15	0.2	0	45	1.5	4.74
24	2 400	10	0.3	0.13	0	2	4.51
25	2 400	5	0.4	0.19	11	0	4.98

将测力仪采集的三向力数据代入公式,通过计算可得到各试验号的总磨削力,即:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

式中: $F$ —总磨削力,N; $F_x$ —轴向磨削力,N; $F_y$ —进给方向磨削力,N; $F_z$ —径向磨削力,N。

### 5.2 极差分析

极差分析是一种比较各因素影响程度的方法,极差值越大,代表试验结果的影响越大。

磨削力极差分析如表 5 所示。

表 5 磨削力极差分析

试验号	主轴转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	磨削深度 $a_p/\text{mm}$	磨削角 $\theta/(\circ)$	磨削高度 $h/\text{mm}$	超声电流 $I/\text{A}$
均值 1	7.728	12.814	5.542	6.954	6.428	6.778
均值 2	7.206	6.832	6.104	6.968	6.874	7.320
均值 3	6.548	5.534	7.586	6.718	6.802	6.757
均值 4	6.750	4.216	7.384	6.770	6.938	6.568
均值 5	6.622	5.458	8.238	7.444	7.812	7.544
极差 R	1.180	8.598	2.696	0.726	1.384	0.976

计算极差值时,先计算 6 个试验因素各水平的均值,把最大均值与最小均值相减即可得到极差值,按照极差值大小排序可以得出影响程度关系为: $f > a_p > h > n > I > \theta$ 。可以看出:进给速度和磨削深度是影响磨削力大小的重要因素,超声电流和磨削角对磨削力的影响小。通过极差分析也验证了单因素试验中,磨削角对磨削力影响小的结论。

### 5.3 方差分析

方差分析是将数据的总变化分解为因素引起的变化和误差引起的变化,通过构造  $F$  比来判断各因素作用的显著程度。

磨削力方差分析如表 6 所示。

表 6 磨削力方差分析

因素	偏差平方和	自由度	F 比	是否显著
主轴转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	4.889	4	2.977	否
进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	230.521	4	140.39	是
磨削深度 $a_p/\text{mm}$	24.739	4	15.066	是
磨削角 $\theta/(\circ)$	1.642	4	1.000	否
磨削高度 $h/\text{mm}$	5.206	4	3.171	否
超声电流 $I/\text{A}$	3.403	4	2.072	否
误差	1.64	4		

由于试验的因素变量与所选正交表的列数均为 6,试验因子占满整个正交表,没有误差列,笔者选用偏差平方和数值最小的项作为误差项,对其他因子作  $F$

检验;当因子自由度为 4 时,查阅  $F$  分布表可得到  $F$  临界值为 6.39。当  $F$  比大于  $F$  临界值时,该因素的影响显著。通过计算和比较可知,进给速度和磨削深度影响显著,其余因素影响不显著。

## 6 结束语

磨盘端面与工件平行时,磨盘端面容易对已加工表面造成二次破坏,让磨盘端面与工件呈一定磨削角可以解决以上问题;实际加工中,存在两种磨削高度,即工件在磨盘端面中部和底部。为研究磨削角与磨削高度对磨削力的影响,本文设计了单因素与正交试验,通过分析试验结果,有以下结论:

(1)磨削角对磨削力的影响不大,磨边时瓷砖与磨盘端面的磨削角具有较大的取值范围;

(2)磨削高度对径向磨削力影响最为明显,瓷砖在磨盘端面底部(高度  $h=0$ )磨削时径向磨削力最小,且旋转超声磨削的径向力比传统磨削减小 27%;

(3)通过极差分析和方差分析得到各因素对磨削力的影响程度从大到小依次为进给速度、磨削深度、磨削高度、主轴转速、超声电流和磨削角,其中进给速度与磨削深度对磨削力影响显著。

## 参考文献 (References):

- [1] TUERSLEY I P, JAWAID A, PASHBY I R. Review: various methods of machining advanced ceramic materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, 42(4):377-390.
- [2] KOMARAI AH M, REDDY P N. Rotary ultrasonic machi-

ning—a new cutting process and its performance[J]. *International Journal of Production Research*, 1991, 29(11): 2177-2187.

- [3] NING F, WANG H, HU Y, et al. Rotary ultrasonic surface machining of CFRP composites: a comparison with conventional surface grinding[J]. *Procedia Manufacturing*, 2017(10):557-567.
- [4] WANG H, CONG W, NING F, et al. A study on the effects of machining variables in surface grinding of CFRP composites using rotary ultrasonic machining[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 95(3):3651-3663.
- [5] 孙 福. 超声波瓷砖切割机[J]. 建材工业信息, 1998(12):20.
- [6] ZHANG C, FENG P, ZHANG J, et al. Investigation into the rotary ultrasonic face milling of K9 glass with mechanism study of material removal[J]. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2012, 25(4):248-266.
- [7] 张 娇. 砖超声辅助磨削工艺实验研究[D]. 广州:广东工业大学机电工程学院, 2016.
- [8] 唐 岳. 瓷砖磨边机超声振动系统的设计及实验[D]. 广州:广东工业大学机电工程学院, 2016.
- [9] ROSENBAUM P R. Dispersion effects from fractional factorials in taguchi's method of quality design[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1994, 56(4):641-652.
- [10] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9):52-55.
- [11] 赵 霞,郭建亮,迟 军,等. 磨削加工质量与生产效率的综合优化研究[J]. 机电工程, 2014, 31(6):749-752.

[编辑:方越婷]

## 本文引用格式:

黎志国,张永俊,姚 震,等. 基于旋转超声的瓷砖磨边磨削力研究[J]. 机电工程, 2019, 36(10):1039-1044.

LI Zhi-guo, ZHANG Yong-jun, YAO Zhen, et al. Grinding force of tile edge based on rotary ultrasonic[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(10):1039-1044.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>