

文章编号 1004-924X(2016)增-0394-06

利用状态信号特征识别 BK7 玻璃的去除性能

毕 果, 郭昕乾*, 孙郅佶, 许涛林

(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 搭建了金刚石磨粒划擦实验台, 对 BK7 玻璃进行斜坡划刻和等切深划刻, 采集过程中的声发射信号和力信号, 得到其典型特征, 实验结果表明过程信号特征能够实时准确表征脆性材料的去除过程, 大的刀具角度对裂纹的产生和扩展起抑制作用, 其划刻过程中的力和声发射信号幅值波动较为平缓, 小的刀具角度以及切削刃的增加则会引起更显著的脆性断裂, 其表现为力和声发射信号幅值波动的加剧, 三类金刚石压头划刻 BK7 光学玻璃实验表明, 脆性去除阶段, BK7 光学玻璃存在明显的切深转折点, 超过该切深时, 材料会产生更大的脆性破坏, 相应的声发射能量增长率也显著提高, 具体数值与压头类型有关。研究结果有利于在实际加工中可以利用过程信号优化加工参数, 平衡脆性材料加工中加工效率和加工质量的矛盾。

关键词: BK7 光学玻璃; 划擦试验; 状态信号; 特征提取

中图分类号: TH162+.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0394

Recognition of removal performance of BK7 glass by taking advantages of status signal features

BI Guo, GUO Xin-qian*, SUN Zhi-ji, XU Tao-lin

(College of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

* Corresponding author, E-mail: 811200442@qq.com

Abstract: The experiment table for scratching of grinding material of diamond has been established, and the BK7 glass is scratched aslope and cut in deeply for scratching. Collect acoustic emission signal and force signal in the process, and then obtain its typical features. Experimental results show that the process signal features may represent the removal process of hard brittle material with real time and accuracy. Great cutting-tool angle has inhibiting effect on production and extension of crack, and the amplitude fluctuation of force and acoustic emission signals in the scratching process is relatively slow; while small cutting-tool angle and the increase of cutting edge may give rise to more obvious brittle fracture, and it represents that the amplitude fluctuation of force and acoustic emission signals is heightened. Experiments of BK7 optical glass for scratching of three diamond indenters have show that: in the phase of brittle removal, the obvious cutting-in turning point exists for BK7 optical glass; when exceeding such cutting-in point, materials will generate greater brittle failure, and corresponding growth rate of acoustic emission energy may also be increased. Specific value has connection with type of indenter. Research results are beneficial to balance of contradiction between processing effi-

收稿日期: 2016-05-07; 修订日期: 2016-06-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51275433); 福建省自然科学基金资助项目(No. 2016J01260)

ciency and processing quality of hard brittle materials in the process by taking advantages of optimization processing parameters of process signals in the actual processing.

Key words: BK7 optical glass; scratching experiment; status signal; feature extraction

1 引 言

脆性材料硬度高、脆性大,在加工过程中容易产生裂纹、断裂等,而且加工刀具极易磨损,所以研究脆性材料小切深下的塑性域加工特性具有重要意义。脆性材料分为硬脆材料和软脆材料,硬脆材料光学元件主要通过超精密研磨,抛光及超精密磨削加工,软脆材料光学元件主要通过金刚石切割加工^[1]。为提升脆性光学元件的加工效率和加工质量,人们对脆性材料的去除机理进行了深入的研究。Lawn 发现脆性材料的去除机理有脆性断裂和塑性变形两种去除模式,前者通过空隙和裂纹的形成和扩展,剥落及碎裂等方式来完成,后者类似于金属磨削中的切削成形过程,其中涉及摩擦,耕犁和切削成形^[2]。金刚石划刻实验是研究脆性材料特性的常用方式。Puttick 等人发现,在亚微米深度划刻脆性材料时,显微观测到脆性材料表面产生整齐的凹槽,并且两侧有塑性凸起,说明脆性材料也可以类似金属发生塑性去除^[3]。王景贺等人对 KDP 晶体面的不同晶向进行压痕实验,得出其硬度、断裂韧性随不同晶向的变化规律。材料的硬度越小,断裂韧性越大,越容易产生塑性变形。并利用超精密机床加工出表面粗糙度为 7.5 nm 的超光滑表面^[4]。Sinclair 和 Johnson 等得出脆性材料的变形情况与压头压入深度及压力紧密相关,它影响着材料表面的变形轮廓,裂纹的扩展。在塑性模式加工下产生较少的裂纹,能够得到较高的形状精度和较好的抛光表面,因此研究脆性材料的不同去除模式的识别方法具有重要意义^[5-6]。加工过程信号对加工状态实时表征,为此不少学者也进行了尝试。李淑娟等人发现对 SiC 晶体划痕过程中产生许多微细粉末状碎屑,是由于锋利的金刚石刀具压入 SiC 晶体表面时,共价键断裂形成微裂纹,当压力增加时,共价键断裂数量增加,声发射信号能量增大,主要表现为脆塑性共存的方式去除^[7]。迟玉伦等人建立了光学玻璃磨削声发射监测实验系统,得出光学玻璃超精密磨削过程中,磨削进给量和砂

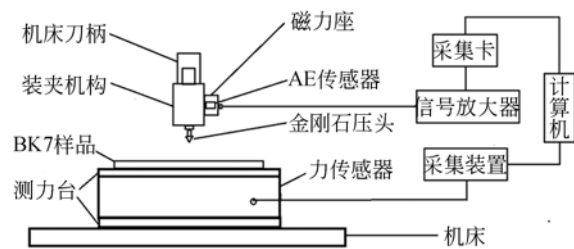
轮线速度对声发射信号影响较大。通过优化磨削工艺参数,使磨削后的光学玻璃表面粗糙度达到 $0.02 \mu\text{m}$ ^[8]。

本文基于状态信号特征识别 bk7 光学玻璃的去除性能,搭建了金刚石磨粒划擦实验平台,对 BK7 玻璃分别进行斜坡划刻和等切深划刻,采集了过程中的声发射信号和力信号并对其进行信号分析,并且对比了不同加工条件下的信号特征。

2 实验方法

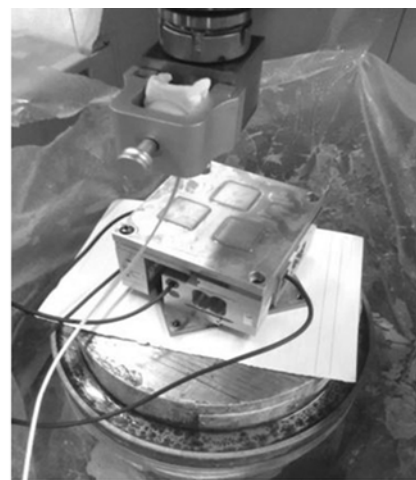
2.1 实验方法

实验装置原理如图 1(a)所示,实物如图 1(b)所示,以四轴精密机床为基础搭建金刚石划刻装



(a)原理图

(a) Schematic diagram



(b)实物图

(b) Material object

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental device

置,声发射传感器通过磁力座吸附划刻刀具的装夹机构上,划刻刀具采用标准金刚石压头,金刚石压头通过螺纹连接到装夹机构上,便于更换。工件放置于测力平台上,测力平台由 4 个 S2M 力传感器自行搭建,整体吸附在机床磁性工作台上。实验主要分为斜坡划刻和等切深划刻,基本实验过程如下:首先根据预先设定好角度和划擦长度,利用声发射接触信号结合机床数控系统显示的实际坐标,编制数控程序,实现对脆性材料的斜坡划刻或等切深划刻,同时采集过程中的声发射和力信号。

2.2 实验装置及实验条件

利用 PCI-2 声发射检测系统和 R50A 声发射传感器实现对 AE 的采集,声发射采样频率为 1 MHz。使用 4 通道数据采集系统和 S2M 力传感器实时检测并采集压力值,信号采集频率为 19.2 KHz。

实验中分别使用 120°洛式压头(顶端球面半径为 0.2 mm)、90°洛式压头和 136°维式压头(横刃 $1 \mu\text{m}$)进行划刻。实验对象均为 bk7 光学玻璃($\Phi 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,表面粗糙度 $R_a = 0.023 \mu\text{m}$),基本加工参数如表 1、表 2 所示。

表 1 斜坡划刻加工参数表

Tab.1 Processing parameters of ramp scratching

加工参数	进给速度 (mm/min)	横向进给量 (mm)	纵向最大切深 (μm)
数值	600	10	30

表 2 水平划刻加工参数表

Tab.2 Processing parameters of horizontal scratching

加工参数	进给速度 (mm/min)	划刻长度 (mm)	纵向切深 (μm)
数值	150	13	5,10,15,20,25,30,35

3 结果分析

3.1 斜坡实验结果分析

利用 3 种金刚石压头对 BK7 进行同等条件下的斜坡划刻实验,图 3 所示为其对应的力和 AE 信号时域波形图。

对比力信号的时域波形可知 90°洛式压头在

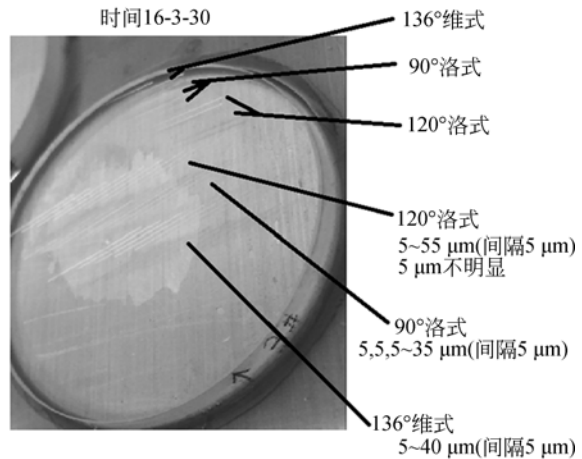


图 2 划刻后的 BK7

Fig.2 BK7 after scratching

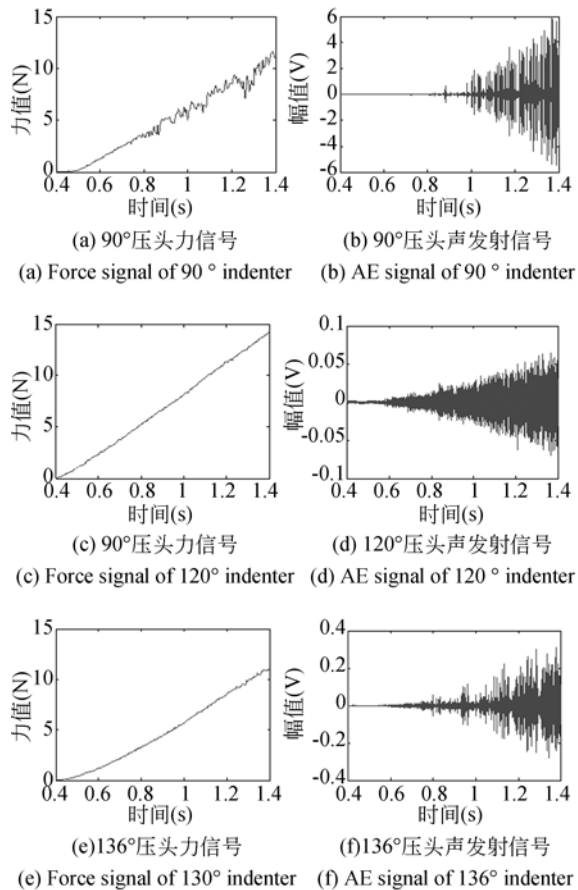


图 3 不同压头划痕试验下力信号与声发射信号

Fig.3 Force signal and acoustic emission signals with different diamond indenters after scratching experiments

图中 0.4~1 s 内,力值匀速增加,而后上升总趋势仍呈现线性,但明显波动增加。相比之下,120°洛式压头与 136°维式压头力值线性增加的过程

中随机波动明显较小,并且 120° 洛式上升更为稳定。从力的数值来看,同切深下 120°洛式压头力值更大,其次是 136°维式压头,90°洛式压头力值最小。产生差异的原因可能与压头与玻璃表面接触面积有关,另外划刻用的不同形状金刚石深宽比也不同,角度越小的压头,宽深比越小,侧向压力值也越小。

从声发射信号来看,90°洛式压头斜坡实验在较大切深情况下以突发式声发射信号为主^[9]。突发式声发射信号由高幅值的不连续、持续时间较短的脉冲构成,与裂纹的形成与扩展有关。120°洛式的声发射能量增长相对平缓,并且只产生了较少的冲击。136°维式压头在较大切深情况下也产生了部分突发式声发射信号。声发射信号和力信号的分析结果吻合,其原始波形都很清晰的表征了金刚石和材料表面干涉作用的变化过程。

由对比分析可知,切削刃形状和数量是影响去除性能的关键因素。增大刀具角度对裂纹的产生会有抑制作用,减少表面及近表面的裂纹扩散。因为大的刀具角度在划痕过程中产生较大的压应力,会抑制裂纹的产生和扩散,同时,在相同的划痕深度,大的刀具角度还有利于减小主应力(即拉压力),避免裂纹的产生。但是过大的刀具角度,刀具容易变钝,不容易产生划痕。

3.2 等切深实验结果分析

为进一步研究切深与信号之间的关系,进行了 5~35 μm 的等切深刻实验,具体参数如表 2 所示。图 4 所示为三种压头不同切深下振铃计数直方图。在 90°洛式压头实验中,切深在 30 μm

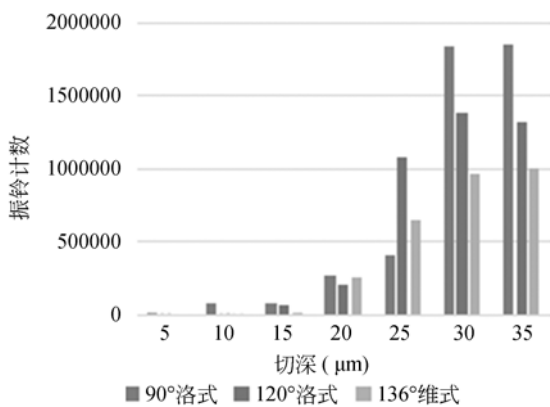
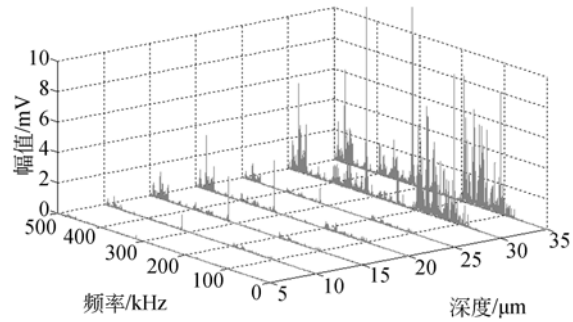


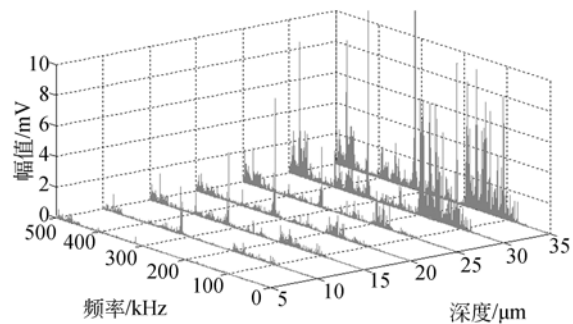
图 4 不同压头的振铃计数直方图(阈值取 0.03 v)

Fig. 4 Histogram of Ring Count with different diamond indenters(Threshold 0.03 v)

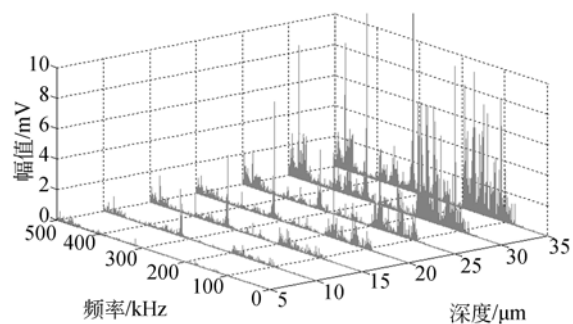
和 25 μm 对比发现振铃计数增长了 7 倍以上,能量大幅度上升。120°洛式压头实验中,切深在 25 μm 和 20 μm 对比,发现振铃计数增长了 5 倍左右。136°维式压头实验在切深增大的同时,能量保持平稳上升。



(a) 90°洛式压头实验频谱图
(a) Power spectrum of 90° Rockwell indenter test



(b) 120°洛式压头实验频谱图
(b) Power spectrum of 120° Rockwell indenter test



(c) 136°洛式压头实验频谱图
(c) Power spectrum of 136° Rockwell indenter test

图 5 三种压头水平划刻试验(随切深变化)的频谱图
Fig. 5 Spectrogram with different diamond indenters after scratching experiments (variation with depth of cut)

图 5 所示为三种压头不同切深声发射信号的频谱图,对比发现大切深时低频段(100~200

kHz)比中频段(300~330 kHz)和高频段(450 kHz以上)能量增加更为显著。而在切深较小时,中、高频段相比于低频段始终保持相对较大的幅值。

3.3 划痕检测

图 6(a)~(d)均为斜坡划刻时 136°维式压头在小切深下的划痕。6(e)~(i)为三种压头切深在 10~30 μm 时的划痕。可以看出切深在 1 μm 时, bk7 玻璃划痕完整连续, 材料以塑性去除为主。在切深达到 3 μm 时, 划痕边缘会出现塑性变形和鳞状破裂^[10], 当切深为 10 μm 时, 划痕边

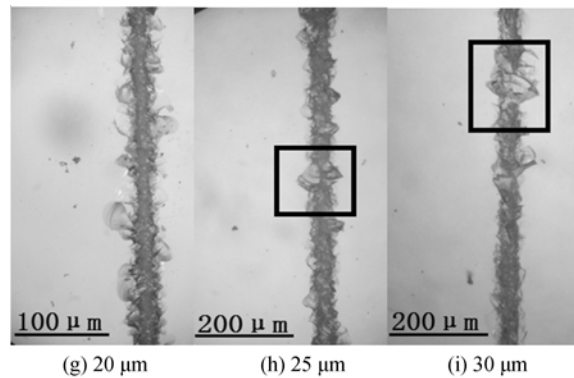
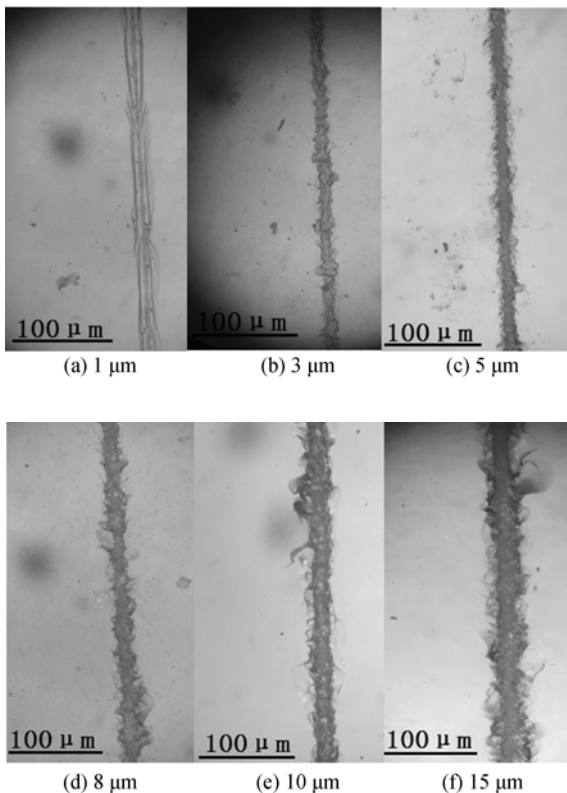


图 6 电子显微镜下划痕图像

Fig. 6 Image of scratches under an electron microscope

缘除了材料崩碎之外,在个别位置出现了微小的裂纹,当切深达到 20 μm 时,划痕边缘产生大量裂纹及更大的崩碎。当切深超过 25 μm 时, BK7 产生更大的脆性破裂,表面布满脆性崩碎及脆性裂纹,甚至有许多个剥离的碎块,如图方框处,检测结果与过程信号分析结果相吻合,表面大量脆性崩碎引起了突发型声发射信号特征以及切削力的较大波动。

4 结 论

增大刀具角度能一定程度上抑制裂纹的产生,减少表面及近表面的裂纹扩散。在脆性去除阶段, BK7 光学玻璃存在明显的切深转折点,超过该切深时,材料会产生更大的脆性破坏,崩碎和裂纹都增加显著,相应的声发射能量增长率也显著提高,具体数值与压头类型有关。因此,利用过程信号可以实现加工参数的优化,以及在保证加工质量的同时,有效提高加工效率。

参考文献:

- [1] 张文生,张飞虎,董申,等. 光学脆性材料的金刚石切削加工[J]. 光学精密工程, 2003, 11(2): 139-143.
ZHANG W SH, ZHANG F H, DONG SH, et al.. Diamond cutting of optical brittle materials [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2): 139-143. (in Chinese)
- [2] LAWN B R, SWAIN M R. Indentation fracture: principles and application [J]. *Journal of Materials Science*. 1975, 10(6): 1049-1081.
- [3] PUTTICK K E, FRANK A. The physics of ductile-regime machining transitions single point theory and experiment [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1990, 56(5): 788-792.
- [4] 王景贺,陈明君,董申,等. KDP 单点金刚石切削脆性转变机理的研究 [J]. 光电工程, 2005, 32(7): 67-88.
WANG J H, CHEN M J, DONG SH, et al.. Study

- on the mechanism of brittle-ductile transition for turning KDP crystal with single point diamond[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 7 32(7): 67-88. (in Chinese)
- [5] SINCLAIR G B, FOLLANSBEE P S, JOHNSON K L. Quasi-static normal indentation of an elasto-plastic half-space by a rigid sphere- II results [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1985, 21 (8): 865-888.
- [6] ROWCLIFFE D J, JOHNSON S M. Mechanical properties of single crystal ceramics[J]. *Proceedings SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 1986, 68 (9): 143-158.
- [7] 李淑娟, 崔丹, 王小雪, 等. 基于声发射的单晶 SiC 材料去除机理研究[J]. *人工晶体学报*, 2014, 1, 43(1): 134-142.
LI SH J, CUI D, WANG X X, *et al.*. study on the material removal mechanism of SiC single crystal based on acoustic emission [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2014, 1, 43(1): 134-142. (in Chinese)
- [8] 迟玉伦, 李郝林. 光学玻璃磨削状态的声发射检测技术[J]. *制造业自动化*, 2010, 10(上), 32(10): 10-13.
CHI Y L, LI H L study on ultra-precision grinding of optical glass based on acoustic emission technology [J]. *Manufacturing Automation*, 2010, 10(上), 32(10): 10-13. (in Chinese)
- [9] 梁艺军, 刘俊锋, 张巧萍, 等. 环形腔全光纤 F-P 干涉仪的声发射检测[J]. *光学精密工程*, 2009, 17 (8): 1825-1831.
LIANG Y J, LIU J F, ZHANG X P, *et al.*. Ring cavity all fiber F-P interferometer used in detection of acoustic emission. [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1825-1831. (in Chinese)
- [10] 唐修检, 刘谦, 田欣利, 等. 切向载荷作用下氮化硅陶瓷崩碎损伤规律与机理[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 2023-2030.
TANG X J, LIU Q, TIAN X L, *et al.*. Regulation and mechanism of edge chipping for Si₃N₄ ceramics worked by sliding loads [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 2023-2030. (in Chinese)

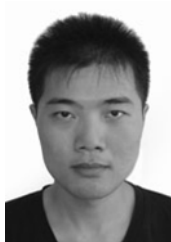
作者简介:



毕 果(1978—),女,河南南阳人,博士,副教授,硕士生导师,2000 年于郑州工业大学获得学士学位,2003 年于郑州大学获得硕士学位,2007 年于上海交通大学获得博士学位,主要从事精密加工过程监测等方面的研究。
Email: guobi@xmu. deu. cn



孙鄧佶(1990—),男,四川成都人,硕士研究生,2013 年于厦门大学获得学士学位,主要从事超精密切削机床动态特性监控。E-mail: devinszj@163.com



郭昕乾(1991—),男,福建福州人,硕士研究生,2014 年于集美大学获得学士学位,主要从事超精密加工与检测方面的研究。E-mail: 811200442@qq.com



许涛林(1991—),男,湖南岳阳人,硕士研究生,2013 年于厦门大学获得学士学位,主要从事超精密加工与检测方面的研究。E-mail: 513673291@qq.com