

DOI: 10.3901/JME.2022.15.121

# 单晶硅微细磨削非稳态特征声发射信号感知研究\*

张学学 任莹晖 杨伟程 李 伟 于康宁  
(湖南大学机械与运载工程学院 长沙 410082)

**摘要:** 针对硬脆材料微小零件和微结构微细磨削加工时非稳态特征感知和识别难题,开展单晶硅微细磨削非稳态特征声发射信号感知方法和分析研究。设计了单晶硅微槽阵列微细磨削单因素工艺实验,搭建了声发射(AE)信号实时监测平台,基于均方根法提取了信号时域特征并采用小波包分解法和快速傅里叶变换划分了对应频带。选取微磨具直径损失量、微槽平均崩边宽度及微槽锥度角作为微磨具磨损和磨削质量变化的非稳态特征评价指标。探究了声发射信号时、频域特征与非稳态特征间的相关性。结果表明,AE信号分析区间的均方根与微槽平均崩边宽度近似为线性关系。低频带信号(0~62.5 kHz)主要源于机械振动及磨屑与工件、微磨具间的摩擦作用。中频带AE信号(62.5~125 kHz)主要源于微磨具对微槽的成型作用,其能量占比能反映微磨具磨损程度。高频带AE信号(125~500 kHz)主要源于材料的脆性碎裂去除,其能量占比能反映微槽崩边损伤程度。

**关键词:** 微细磨削; 非稳态特征; 声发射; 时频域特征; 信号感知

**中图分类号:** TG156

## Study on Acoustic Emission Signal Perception of Unsteady Characteristic in Micro-grinding of Monocrystalline Silicon

ZHANG Xuexue REN Yinghui YANG Weicheng LI Wei YU Kangning  
(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082)

**Abstract:** To solve problem of unsteady characteristics identification, the signal processing and identification method are carried out based on acoustic emission (AE) signal of unsteady feature in monocrystalline silicon micro-grinding. The single factor micro-grinding experiment of monocrystalline silicon micro-groove array is designed, and the real-time monitoring platform for the AE signal is built. The signal time domain characteristics are extracted by root mean square (RMS) method and the frequency bands are divided by wavelet packet decomposition (WPD) and fast Fourier transform (FFT). Tool tip diameter loss, micro-groove mean edge chipping width and micro-groove taper angle are selected as indexes to evaluate unsteady features of micro-grinding connected with tool wear and grinding quality variation. Furthermore, on the basis of experimental results the correlation between indexes and frequency band characteristics is discussed. The results show that the RMS of AE signal analysis interval is approximately linear with micro-groove mean edge chipping width. Low frequency band signal (0-62.5 kHz) mainly comes from mechanical vibration and friction of debris between workpiece and tool. Intermediate frequency band signal (62.5-125 kHz) mainly comes from the forming effect of the tool on the micro groove, whose energy proportion can reflect the tool wear degree. High frequency band signal (125-500 kHz) mainly comes from the material brittle fracture removal, whose energy proportion can reflect the edge chipping degree.

**Key words:** micro-grinding; unsteady characteristics; acoustic emission; time frequency characteristics; signal perception

## 0 前言

随着光伏新能源、半导体芯片、集成电路产业的快速发展,采用微细磨削技术加工的硅基硬

脆材料微孔、微通道、微棱柱等微结构和微小零件的应用需求急剧扩大<sup>[1-3]</sup>。受材料硬脆特性、加工尺寸效应、机械振动及磨削温度等因素影响,常出现微磨具不确定磨损、微结构不规则崩边等非稳态特征<sup>[4-9]</sup>,严重影响工件的加工质量

\* 国家自然科学基金资助项目(52075161, 51875192)。20211203 收到初稿, 20220208 收到修改稿

和使役性能,致使微细磨削加工质量与效率之间的矛盾尤显突出。

为抑制微细磨削过程中的非稳态特征,提高磨削质量和效率,国内外学者尝试从工艺参数优化<sup>[4]</sup>、微磨具结构改进<sup>[10-11]</sup>、复合工艺设计<sup>[12-14]</sup>等方面展开研究提出优化方案。如程军等<sup>[4]</sup>通过控制进给率和主轴转速以期实现单晶硅材料延性域磨削去除。CHEN 等<sup>[10]</sup>制备出中心对称倒置锥形分叉结构 CBN 微磨具,HSUE 等<sup>[11]</sup>研制了螺旋槽型金刚石微磨具,通过解决排屑难题来改善磨削质量。CAO 等<sup>[12]</sup>将电化学辅助微细磨削工艺,ZHANG 等<sup>[13]</sup>将超声振动辅助微细磨削工艺,以及 LI 等<sup>[14]</sup>将化学改性液软化工件表面技术应用于玻璃、陶瓷、单晶硅等硬脆材料微小零件的加工,探索提高加工表面完整性的复合加工方法。这些方案的实现大都离不开对变化的磨削状态物理量的实时监测和反馈控制。

目前用于表征磨削状态的信号主要有振动信号<sup>[15-16]</sup>、力信号<sup>[17-19]</sup>、声发射信号<sup>[20-21]</sup>等。如 RODERIO 等<sup>[15]</sup>利用振动信号监测不同砂轮磨削 AISI 1045 钢表面时的颤振现象。FENG 等<sup>[16]</sup>结合微细磨削过程中磨削力、系统振动、声发射信号和主轴负载等信号分析了刀具磨损和刀具刚度的关系。QIN 等<sup>[17]</sup>实时监测硅片磨削过程中磨削力的变化规律优化工艺参数。SUN 等<sup>[18]</sup>利用磨削力信号验证了所提出的反映微磨具磨削性能和耐磨性的磨削力模型。温雪龙等<sup>[19]</sup>通过磨削力和温度信号验证了所提出的微磨削力热特性理论模型。GU 等<sup>[20]</sup>利用声发射信号探究了划痕实验蓝宝石的损伤演化模型。DIAS 等<sup>[21]</sup>采用声发射信号检测表面质量和尺寸误差。可见,磨削过程非稳态特征的动态识别和预测能有效预警加工质量的变化趋势,从而解决加工质量与效率间的矛盾。但是,目前国内外有关微细磨削技术的研究主要集中于微细磨削机理、微机床及微磨具等方面<sup>[1]</sup>,微细磨削过程信号采集和特征识别方面的研究还有待进一步开展。

因为微磨具尺寸小(直径小于 1 mm)、材料去除率低(小于  $0.1 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ )、主轴转速高(200,000 r/min 以下)等特点<sup>[1]</sup>,易受外在环境机械噪声、电气噪声、振动等因素的干扰,微细磨削过程不稳定,对状态监控的灵敏度及频宽要求较为苛刻。而声发射技术相对其他监测(传感)技术具有优越的信噪比和灵敏度,能有效采集磨削过程中晶粒的分离、裂

纹的产生及扩展、磨粒的切入和破碎、损耗、滑擦以及弹塑性变形等特征<sup>[22]</sup>,在砂轮磨损状态划分<sup>[23-24]</sup>、砂轮修整<sup>[25-26]</sup>、磨削工艺与磨削质量识别和预测方面<sup>[27-28]</sup>得到了广泛的应用。如 MEI 等<sup>[23]</sup>设计单磨粒划痕实验并通过 AE 信号频带特征识别出磨粒的磨损状态。BI 等<sup>[24]</sup>通过分析和处理金刚石砂轮加工脆性材料时的 AE 信号,实现了砂轮磨削状态的划分。JEFFREY 等<sup>[25]</sup>量化了 AE 信号强度与砂轮修整能量(功率)之间的关系,可以预测砂轮修整程度。陈冰等<sup>[26]</sup>利用 AE 信号时域特征确定砂轮修整阈值,实现旋转 GC 磨棒端部在位精密修整金刚石圆弧砂轮过程的在线监测。LI 等<sup>[27]</sup>建立了 AE 信号振幅与工艺参数间的关系模型,并通过单因素实验验证了模型准确度。GAO 等<sup>[28]</sup>通过交叉小波变换和小波相干法对比分析金属激光烧伤和磨削烧伤的 AE 信号,实现了磨削烧伤信号的识别。由此可见,声发射技术对磨削过程非稳态特征具有较强识别能力,将是极具发展前景的微细磨削动态过程的监测技术之一。

本文为探究声发射信号与反映微磨具磨损和磨削质量变化的微细磨削非稳态特征间的相关性,展开单晶硅微细磨削非稳态特征声发射信号感知研究。设计单因素变化单晶硅微槽阵列微细磨削工艺实验,搭建声发射信号监测平台,对信号进行特征提取和频带划分。重点分析声发射信号时域均方根谱(AE<sub>RMS</sub>)分布和频域各频带信号能量占比与非稳态磨削特征评价指标间的相关性。

## 1 实验设计与信号处理方案

### 1.1 实验设计

为提高微细磨削实验微磨具的线速度,在坐标磨床(宁江机床, MK2945c)上搭建了气动高速精密主轴(日本 Nakanishi, HTS1501S-BT40),最高转速可至 150,000 r/min。选用磨头直径  $\Phi 0.5 \text{ mm}$ ,粒度 600#的商业用电镀金刚石笔形微磨棒为微磨具。单面抛光(100)晶面单晶硅为试样(尺寸  $15 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$ , Ra0.5 nm)。实验装置如图 1 所示,实验平台由微细磨削加工实验平台、微磨具磨损在位视觉测量系统、声发射信号采集系统三部分构成。采用机器视觉在位测量不同阶段的微磨具磨头直径。该系统由高分辨相机(大华, A3B00MG000)、定倍率镜头(视清, WWK40-100-111)、背光板、支架和自开发图像处理

系统组成。声发射信号采集系统(美国 PAC, PIC-2)由高灵敏度谐振式声发射传感器(美国 PAC, R6α)、前置放大器、信号采集器和监视系统构成, AE 信号采集流程见图 2。AE 信号采样频率为 2 MHz, 前置放大增益为 40 dB。

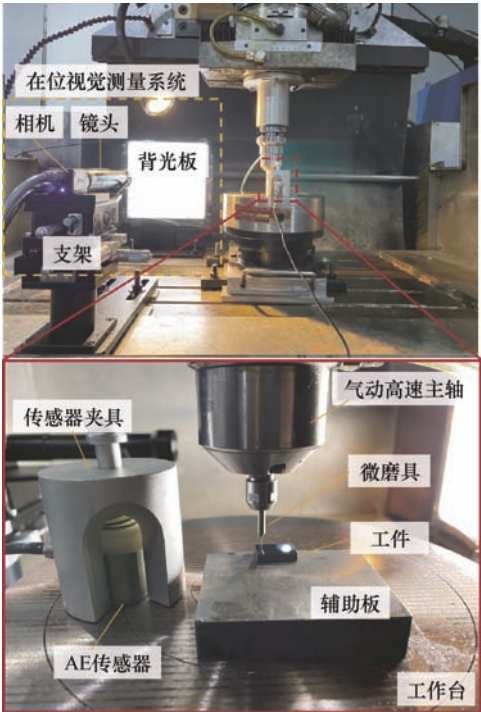


图 1 微细磨削实验平台

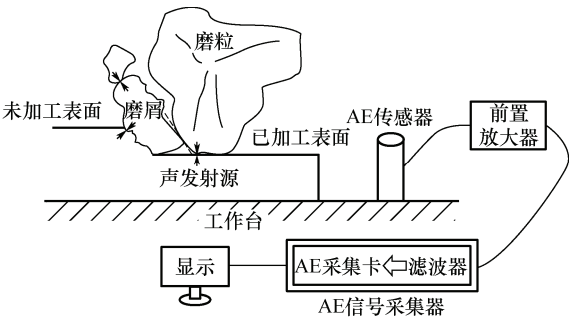


图 2 AE 信号采集流程示意

设计单因素微槽阵列微细磨削实验, 实验示意如图 3 所示。单次磨削成型 8 mm 长度微槽(磨削深度 50~200  $\mu\text{m}$ ), 磨削深度、进给率和主轴转速详见表 1。该实验分为两个实验部分, 首先是微磨具磨损状态划分预实验, 以 12 条间距 1 mm 的微槽为一组阵列, 测定本实验用微磨具的磨损状态。每组微槽阵列采用全新微磨具磨削完成。每完成一条微槽, 采用机器视觉在位测量微磨具的磨头直径, 取 5 次径向采样平均值为磨头直径变化参考值。其次是声发射信号采集实验, 以 6 条微槽为一组阵列, 探究 AE 信号与微细磨削非稳态特征的相关性。仅

考虑磨削深度单因素变化对微磨具磨损、微槽崩边、微槽锥度角变化时声发射信号的影响。实验时按照磨削时间进行 AE 信号采集, 经进给速度换算, 微槽阵列 AE 信号采样区间的位置如图 4 所示。图 4 中标号 G#1 至 G#6 表示阵列的第 1 条至第 6 条微槽。从 G#1 微槽区间 1 开始采集 AE 信号, 每组微槽阵列内共 12 个采样区间。两相邻采样区间相距 4 mm, 每个区间采样时间为 10 s。表面形貌观察前, 采用超声波清洗机用丙酮和无水酒精依次清洗试样, 再用超景深显微镜(VHX-6000)观察干燥后试样的微槽形貌。

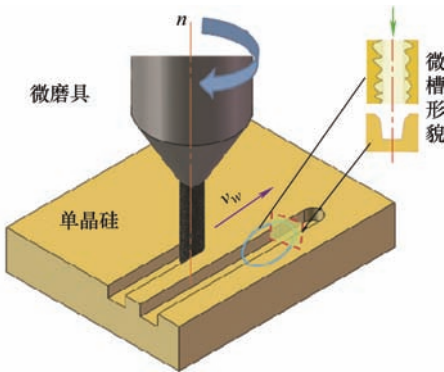


图 3 微细磨削实验示意图

表 1 单晶硅微槽阵列微细磨削实验参数

组号	磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	进给率 $v_w/(\text{mm}/\text{min})$	主轴转速 $n/(\text{r}/\text{min})$
No.1~No.4	50; 100; 150; 200	1	60 000

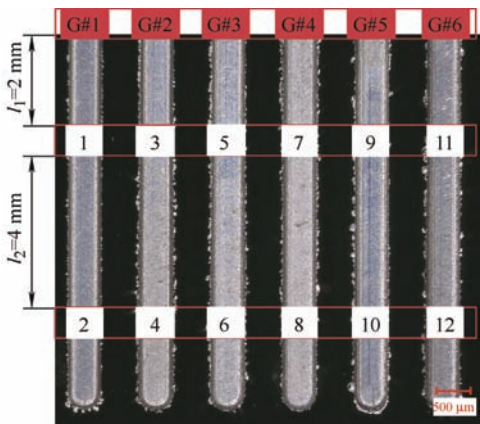


图 4 AE 信号采样区间及编号

1.2 信号处理方案

现有研究<sup>[22]</sup>表明, 磨削过程中的声发射信号源于磨粒与材料间的相互作用。材料去除时的晶粒分离、裂纹的产生及扩展、磨粒的磨损与破碎、摩擦及弹塑性变形等行为都会快速释放能量, 产生瞬态弹性波而表现为 AE 信号。由于声发射源

的差异性,可以采用信号时、频域分析区分不同的材料去除行为。比如在时域上,金属材料切削过程中的塑性变形、摩擦等连续行为表征为连续性信号,切屑对刀具的冲击、工件崩边等瞬时行为表征为瞬时信号<sup>[29]</sup>。频域上,金属材料晶间微裂纹及位错的频率范围可以达到 MHz 及以上,宏观裂纹及崩边的频率范围在百 kHz 附近,剪切变形及弹塑性变形频率范围在百 kHz 以下<sup>[22]</sup>。微细磨削过程的非稳态特征由不同声发射源耦合而成,对 AE 信号进行时、频域分析可以明晰信号

来源,达到识别非稳态特征的目的。由此,提出如图 5 所示的 AE 信号处理方案流程。由图 5a 可知,AE 原始信号包含稳定的连续信号和尖锐的瞬时信号,连续信号的持续时间远大于瞬时信号。瞬时信号的产生与加工过程中的非稳态现象有关<sup>[30]</sup>。为提高信号分析效率,同时保留足够的信号信息,提取采样区间内瞬时信号密度和幅值较大的区间(图 5b,区间长度 0.05 s)进行非稳态特征信号提取分析,包括信号时域特征提取和频域特征提取两部分。

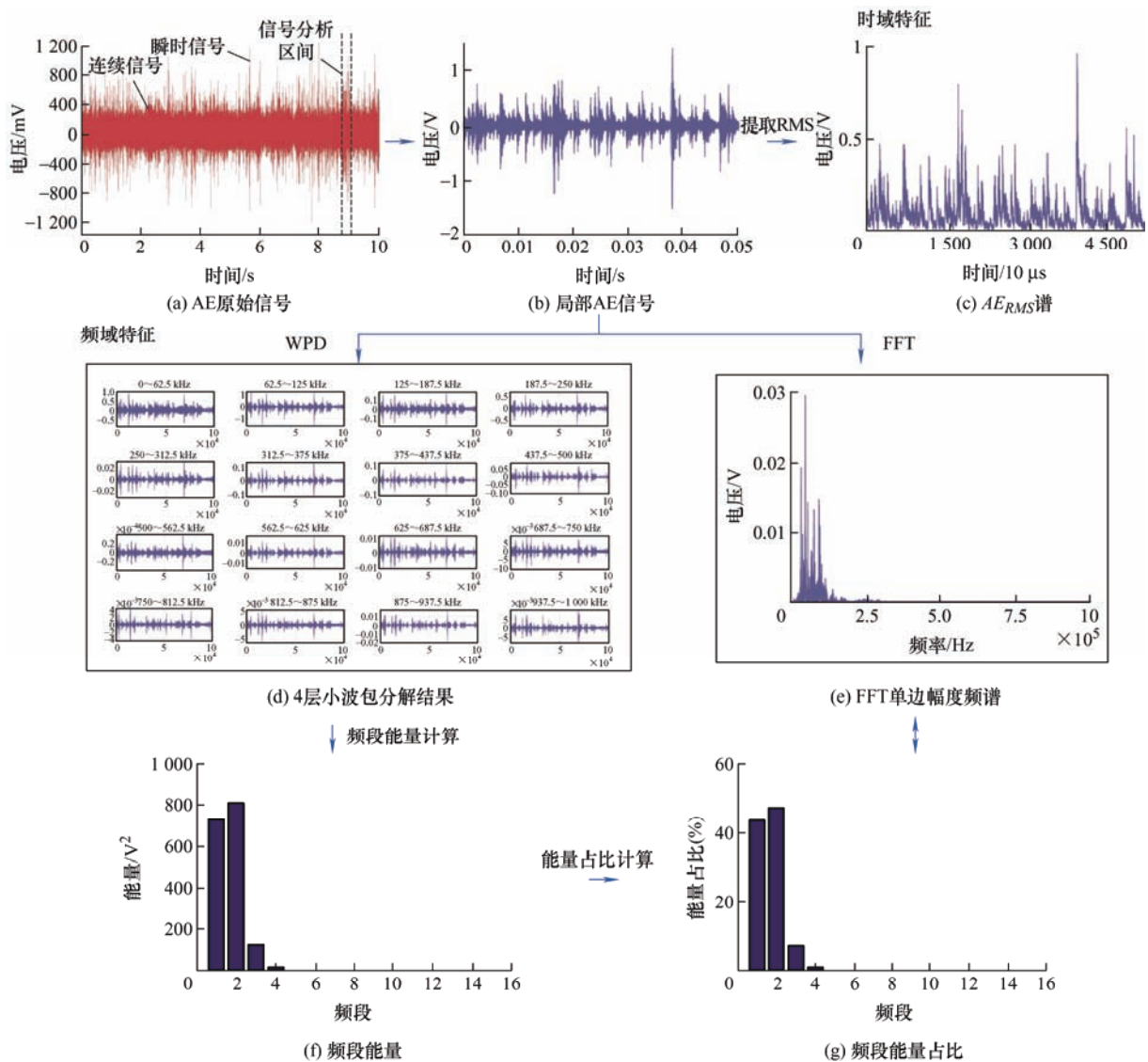


图5 AE信号处理方案

#### (1) 时域特征提取。

首先,对选取段内信号进行时域特征提取(图 5b)。磨削过程中声发射信号处理最常用的统计方法是均方根法(RMS)<sup>[31-32]</sup>,其计算公式

$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AE_{RAW}^2(i)} \quad (1)$$

式中,  $AE_{RMS}$  为 AE 信号均方根;  $AE_{RAW}$  为 AE 原信号;  $N$  为 AE 原信号数据点数。

根据设定的 2 MHz 采样频率,在 0.05 s 长度的信号分析区间内共有  $1 \times 10^5$  个数据点。每  $10 \mu s (N=20)$  记录一次  $AE_{RMS}$ ,即可得  $AE_{RMS}$  谱线(图 5c),以反映信号分布情况。当  $N=1 \times 10^5$  时,记



为  $AE_{RMS}$ 。

## (2) 频域特征提取。

基于信息量优先的原则, 采用四层小波包分解法(WPD)提取 AE 信号的频率信息。得到 0~62.5 kHz(1 频段), 62.5~125 kHz(2 频段), ..., 937.5~1 000 kHz(16 频段)等 16 个频段的时域特征(图 5d)。为减少环境因素对 AE 信号的干扰, 以能量占比(图 5g)来代替实际能量值, 研究不同采样区间的磨削加工非稳态特征。根据式(2)可计算各个频段的能量, 可得 AE 信号 16 个频段的能量分布情况(图 5f)。再根据式(3)计算能量占比<sup>[33]</sup>

$$E_k = \sum_{n=1}^{1 \times 10^5} x_k(n)^2 \quad (2)$$

$$P_k = E_k / \sum_{k=1}^{16} E_k \quad (3)$$

式中,  $E_k$  为第  $k$  个频段的能量,  $x_k(n)$  是第  $k$  个频段的时域信号数据,  $P_k$  为第  $k$  个频段的能量占比。

将 AE 时域信号经快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)得到 FFT 单边幅度频谱(图 5e)。根据 FFT 频谱的频率密度分布情况划分频带, 并确定各频带所包含的小波包分解的频段。而后计算各频带的能量占比, 频带能量占比等于其包含的小波包分解的频段的能量占比之和。最后对各频带能量占比与非稳态特征之间做相关性分析, 确定不同频带 AE 信号的来源。

## 2 非稳态特征评价

考虑单晶硅微槽微细磨削过程声发射源的产生机理, 选取微磨具直径损失量、微槽平均崩边宽度及微槽锥度角作为微磨具磨损变化和材料裂纹扩展非稳态特征的评价指标。

### 2.1 微磨具直径损失量

采用在位视觉测量系统测量微磨具磨头初始直径  $d_0$  和第  $G\#i$  条槽加工完时磨头直径  $d_{Gi}$ 。计算微磨具直径损失量  $w_{Gi}$

$$w_{Gi} = d_0 - d_{Gi} \quad (4)$$

以微磨具直径损失量为指标, 评价微磨具的磨损状况。再通过 Akima 样条曲线拟合, 得到各 AE 采样区间的微磨具拟合直径损失量  $w_i$ 。则可计算各 AE 采样区间的微磨具磨头拟合直径  $d_i$

$$d_i = d_0 - w_i \quad (5)$$

### 2.2 微槽平均崩边宽度

选用微槽平均崩边宽度为指标, 评价微槽加工质量失稳变化情况。计算微槽平均崩边宽度时, 选取 AE 信号采样区间位置的微槽显微形貌图(图 6a), 经灰度和二值化处理得到微槽边刃与槽底黑白对比图(图 6b)。微槽崩边区域与微槽底处理为白色区域, 微槽边刃处理为黑色区域。为统一测量基准, 以采样区间微磨具磨头拟合直径  $d_i$  作为基准代替实际槽宽  $D_i$ , 故可计算第  $i$  区间的微槽平均崩边宽度  $E_{di}$ :

$$E_{di} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{S_i}{L} - d_i \right) \quad (6)$$

式中,  $S_i$  为第  $i$  区间微槽边刃与槽底黑白对比图的白色区域面积,  $L$  为取样区间长度。

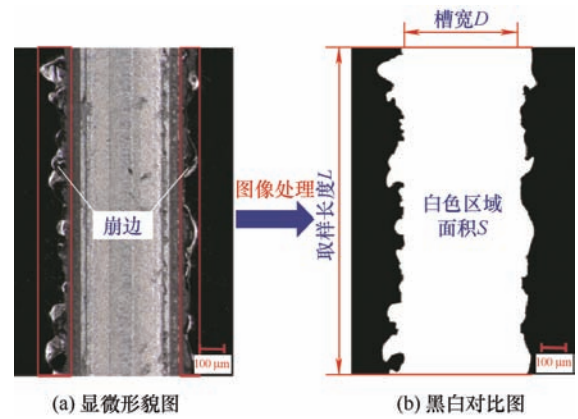


图 6 图像处理前后的微槽形貌图

### 2.3 微槽锥度角

微磨具刚性差, 磨削过程中容易发生变形。加之磨头端部磨粒黏结面积小, 磨粒容易脱落, 形成带锥度的不规则磨损, 并将形状误差复印至微槽<sup>[34-35]</sup>。其次, 微槽底部和侧面的磨屑跟随微磨具的旋转运动从槽底移至槽顶, 微槽侧壁被磨屑多次摩擦挤压会形成更有利的排屑斜面。因此, 由于微磨具的弱刚性、不规则磨损和排屑等原因, 微槽两侧壁会形成如图 7a 所示的锥度角  $\gamma$ , 造成微槽几何截形误差。超景深显微镜测量得到微槽截面曲线后, 确定其侧壁斜面端点坐标(图 7b), 并利用式(7)计算微槽锥度角  $\gamma$

$$\begin{cases} \gamma = \alpha + \beta \\ \alpha = \arctan(W_1 / H_1) \\ \beta = \arctan(W_2 / H_2) \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  为实际左侧壁与理论左侧壁的夹角;  $\beta$  为实际右侧壁与理论右侧壁的夹角;  $W_1$  和  $H_1$  分别为左侧壁上下两端点的横向和纵向距离;  $W_2$  和  $H_2$  分别为右侧壁上下两端点的横向和纵向距离。

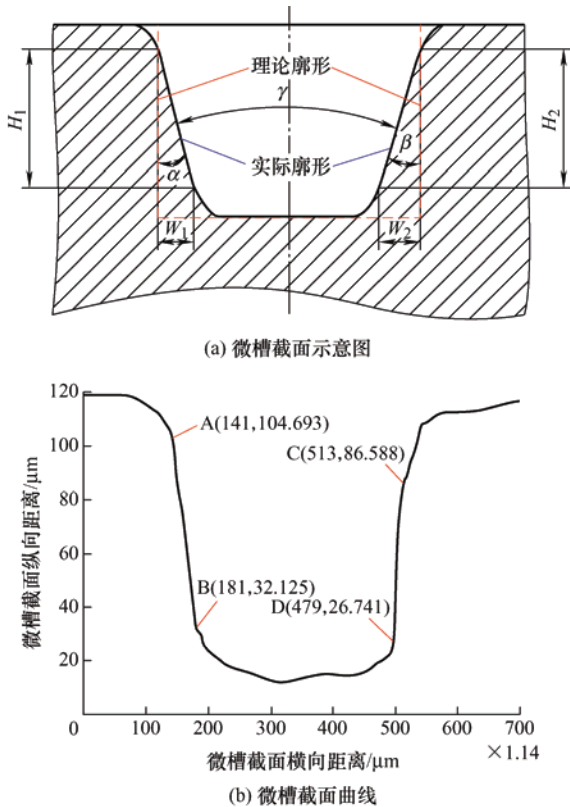


图 7 微槽截面几何形貌及测量示意图

### 3 结果与讨论

#### 3.1 微磨具磨损状态划分

图 8 为微磨具磨损状态划分预实验测得不同磨削深度下微磨具的直径损失量。从图 8 中可见，磨削深度对微磨具磨损的影响规律不明显。随着磨削总长度的增加，微磨具磨损由快速磨损向稳定磨损过渡。以微槽累计磨削长度为基准，可将微磨具磨损过程分为快速磨损区(0~32 mm 区间)、过渡区(32~48 mm 区间)和稳定磨损区(48~96 mm 区间)。观察磨削后的微磨具，可见在微磨具有效磨削区上方堆积部分挤出的磨屑。在有效磨削区出现磨屑黏附、电镀层损伤、磨粒脱落等磨损形式(图 9)。微磨具磨头轴向挤压变形会导致磨头直径变大，其表面黏附的磨屑也会引起微磨具径向直径测量误差，在微磨具磨损过渡区和稳定区出现微磨具直径损失量下降的现象，如图 8 中磨削长度 48 mm、64 mm 处。微磨具挤压变形及磨屑黏附现象在微磨具磨损的过渡区更明显，会增大磨粒的切削抗力和摩擦力，加剧微磨具磨损。磨削过程中电镀层直接与工件接触，摩擦生热也会造成电镀层损伤<sup>[34]</sup>。由此可见，微细磨削过程的 AE 信号存在众多耦合因素。根据微槽

累计磨削长度换算，AE 信号采集微细磨削实验中微磨具在 1~8 采样区间处于快速磨损阶段，在 9~12 采样区间处于过渡磨损阶段。

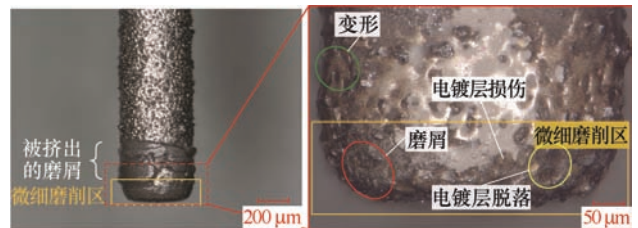
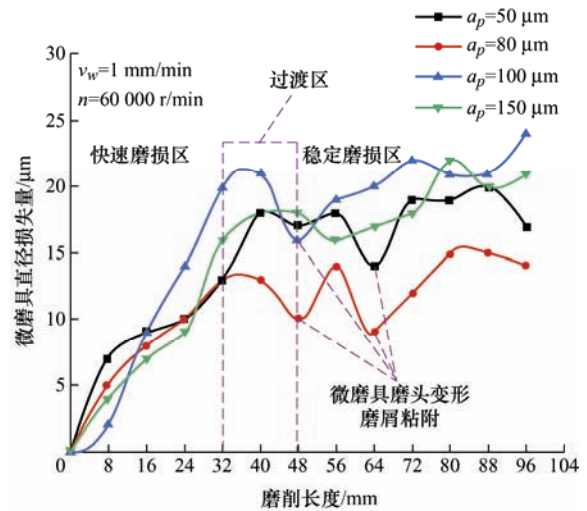
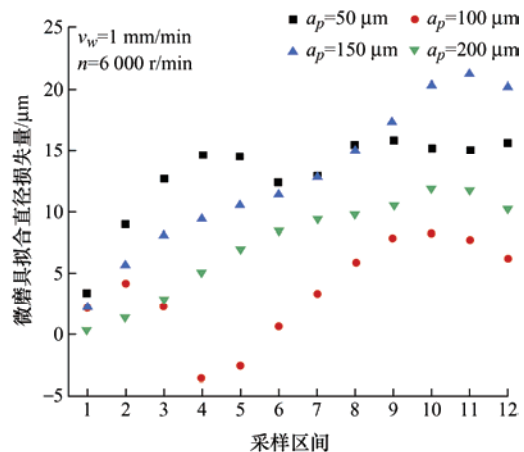


图 9 微磨具磨损显微形貌

#### 3.2 非稳态特征

依据本文所述的单晶硅微槽阵列微细磨削非稳态特征评价方法，AE 信号采集实验不同磨削深度下各 AE 信号采样区间测量和计算的微磨具直径损失量、微槽平均崩边宽度和微槽锥度角结果如图 10~12 所示。

图 10 微磨具拟合直径损失量  $w_i$

由图 10 可知,微磨具直径损失量随着材料去除总量的增加,即从采样区间 1 至 12,先逐渐增大再趋于稳定。磨削深度不同,微磨具直径损失量略有区别。受微磨具挤压变形和磨屑黏附的影响,微磨具直径损失量会出现减小甚至出现负值的情况。如磨削深度  $a_p=100\ \mu\text{m}$  时,采样区间 4、5 对应的微磨具直径损失量为负值。整体变化趋势与第 3.1 节所述微磨具磨损状态分析一致。

由图 11 可知,微槽平均崩边宽度与材料去除总量无明显关联。由于微磨具磨头的磨粒分布、裂纹扩展方向以及振动等因素的不确定性,微槽平均崩边宽度呈不确定分布。当磨削深度  $a_p$  从  $50\ \mu\text{m}$  至  $200\ \mu\text{m}$  变化时,在相同采样区间无明显规律性变化。偶发较大微槽崩边。如磨削深度  $a_p=150\ \mu\text{m}$  时,采样区间 1、3、9~12 的平均崩边宽度,最大值超过  $200\ \mu\text{m}$ 。

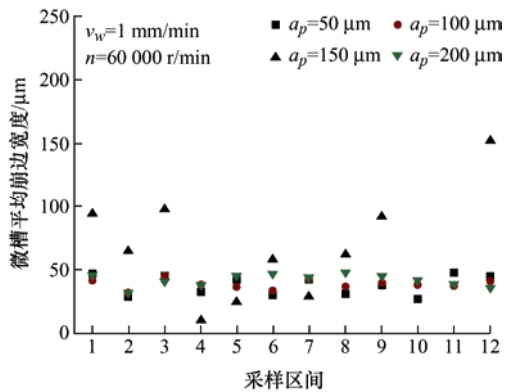


图 11 微槽平均崩边宽度  $E_d$

由图 12 可知,微槽锥度角随材料去除总量的变化不明显,但是随磨削深度增加有减小的趋势。微磨具的不规则磨损、排屑状况以及微磨具磨头约束的强弱都会影响微槽锥度角。磨削深度越小,微磨具受约束越弱,易发生振动,加工区域可控性下降,几何截形误差增大。

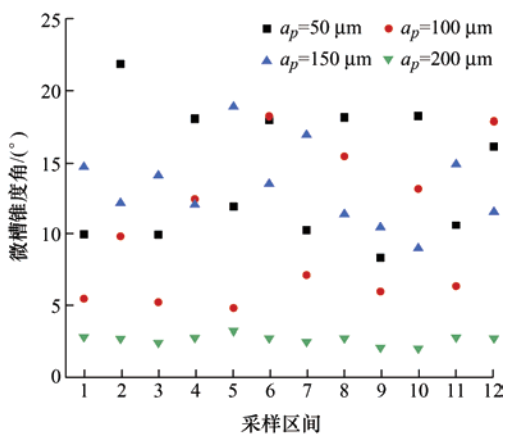


图 12 微槽锥度角  $\gamma$

### 3.3 RMS 分析

选取图 11 中  $a_p=150\ \mu\text{m}$  时较大微槽崩边 AE 信号的时频域特征。崩边主要与材料的脆性去除有关,在 AE 信号时域特征中得到了很好的呈现。 $a_p=150\ \mu\text{m}$  时,各采样区间观察的微槽平均崩边宽度与对应区间信号  $AE_{RMS}$  值的散点图如图 13 所示。由图 13 可知,  $AE_{RMS}$  与微槽平均崩边宽度近似为线性关系。微槽平均崩边宽度由  $9.937\ \mu\text{m}$  增加至  $230.190\ \mu\text{m}$ ,  $AE_{RMS}$  从  $0.238\ \text{V}$  增加至  $1.063\ \text{V}$ , 相应的  $AE_{RMS}$  谱也从整体连续小幅震荡逐渐变为瞬时大幅震荡。由于单晶硅的硬脆特性,在微细磨削过程中材料横向裂纹、径向中位裂纹等宏观裂纹的萌生与扩展是造成微槽崩边的主要诱因。径向中位裂纹往往取决于磨粒卸载过程中产生的残余应力<sup>[36]</sup>,磨粒的高频冲击使残余应力不断产生、积累和释放。又因为在微槽的边刃处容易发生应力集中,致使微槽出现崩边。弱刚性的微磨具在高转速下产生机械振动,以及磨屑排出时伴随的切削和摩擦作用,加剧了宏观裂纹的扩展诱发崩边。裂纹的萌生和扩展以及材料的脆性去除会出现强烈的应力释放,产生高能声发射信号<sup>[20,30]</sup>。因此,微槽崩边越大,  $AE_{RMS}$  谱线的幅值越大,瞬时特征越明显。AE 信号的时域特征反映了微槽崩边程度。

### 3.4 信号能量占比与 FFT 频谱分析

AE 信号的时域特征反映了微槽的崩边程度,但需进一步频域分析明晰 AE 信号的来源。图 14 为  $a_p=200\ \mu\text{m}$  时,微磨具进入微细磨削区前后的 AE 信号能量占比图。微磨具未进入磨削区时(图 14a), AE 信号只出现在  $0\sim 125\ \text{kHz}$  频段(1、2 频段)且以 1 频段为主。此时信号源仅有机械振动和环境噪声。微磨具进入磨削区后(图 14b),在  $125\sim 500\ \text{kHz}$  频段(3~8 频段)出现 AE 信号,但依然以 1、2 频段信号为主。说明有一种能量占比小的高频段信号与微细磨削过程有关,但它不是 AE 信号的主要来源,即在时域特征上表现为瞬时性。而微细磨削过程的主要特征集中于低频段,在时域特征上表现为连续性。时域分析已表明,非连续性微槽平均崩边宽度越大,  $AE_{RMS}$  谱幅值越大,瞬时特征越明显。因此,推断微磨具进入微细磨削区后的高频段特征与微槽崩边具有相关性。由于材料的去除主要来自于微磨具圆周及端部磨粒与微槽的切削、摩擦和挤压作用。而微槽呈半封闭性结构,伴随微磨具的高速旋转( $60\ 000\ \text{r/min}$ ),磨屑在摩擦作用下沿着微磨具与微槽侧壁的间隙



连续排出。因此,推断材料去除和磨屑摩擦产生的 AE 信号都是连续特征。

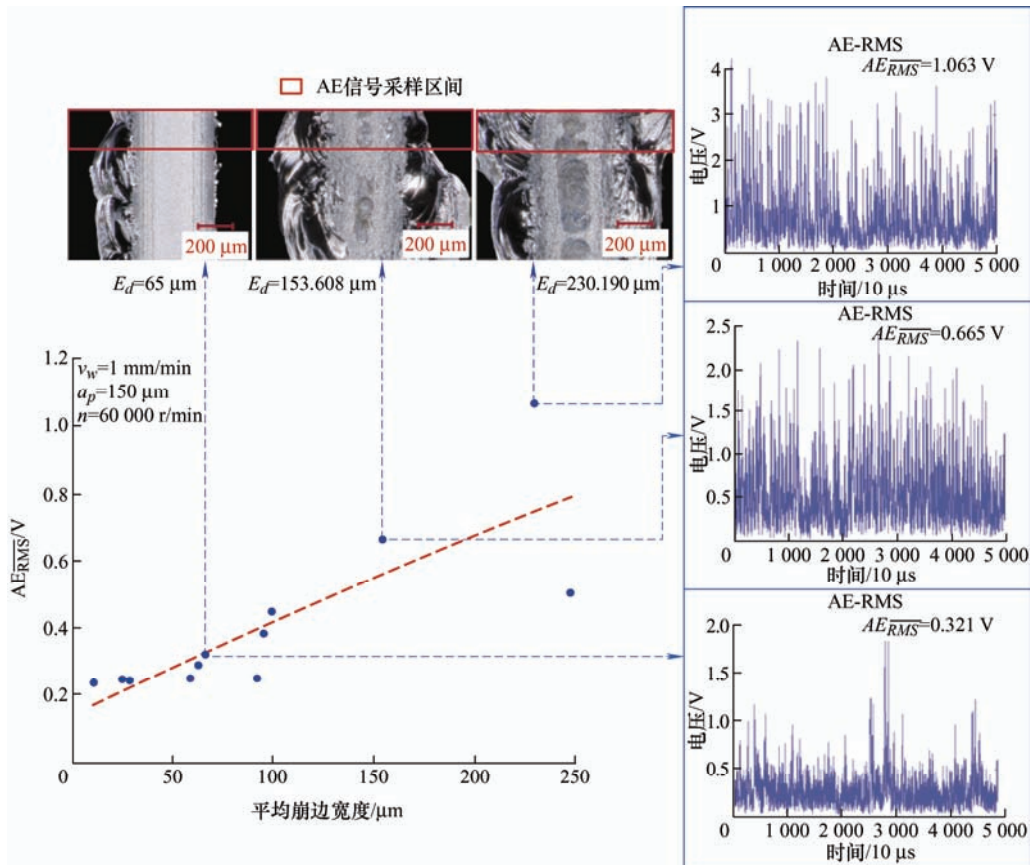


图 13  $AE_{RMS}$  与平均崩边宽度之间的关系

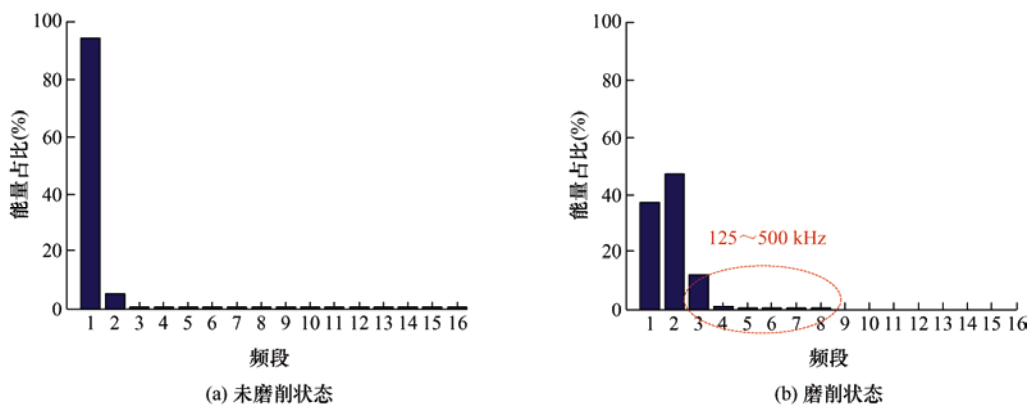


图 14 不同微细磨削状态下 AE 信号各频段能量占比

由 BHUIYAN 等<sup>[29]</sup>的研究,刀具切削时 AE 信号的频率随着切削深度的增大有增大的趋势,这就说明切削作用越强,AE 信号的频率越大。微磨具圆周及端部磨粒对微槽的切削作用是主要的材料去除方式。故推测微磨具圆周及端部磨粒对微槽的成型(切削、摩擦和挤压)作用产生的 AE 信号频率整体要高于磨屑对微磨具及微槽侧壁的摩擦作用产生的 AE 信号频率。

为进一步区分 AE 信号在 0~125 kHz 范围内的频域特征,对 AE 信号进行快速傅里叶变换

(FFT)分析。 $a_p=200\ \mu\text{m}$  时,微磨具进入微细磨削区前后的信号 FFT 频谱如图 15 所示。由图 15b 可知,微磨具进入微细磨削区后,在 0~125 kHz 的频段内 AE 信号频率集中在 0~62.5 kHz 和 62.5~125 kHz 两组频率范围。因此,根据 FFT 频率分布集度将频率特征划分为低频带(0~62.5 kHz)、中频带(62.5~125 kHz)、高频带(125~500 kHz)。低频带对应能量占比图的 1 频段,中频带对应能量占比图的 2 频段,高频带对应能量占比图的 3~8 频段。以此分别研究三个频带的能量



占比与微细磨削非稳态特征各评价指标之间的

关系并验证相关推断。

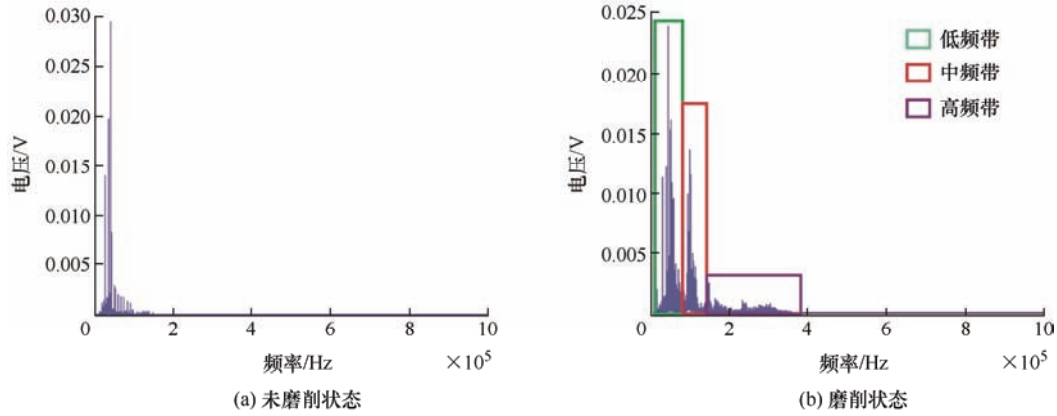


图 15 不同微细磨削状态下 AE 信号 FFT 频谱

$a_p=200\ \mu\text{m}$  时各采样区间的低、中、高三个频带的能量占比如图 16 所示。由图 16 可知, 所有采样区间的信号能量主要来源于低频带( $0\sim 62.5\ \text{kHz}$ )和中频带( $62.5\sim 125\ \text{kHz}$ ), 中频带能量占比相对更大些。两频带能量占比之和维持在 82 % 附近, 且呈负相关关系, 相关系数为  $-0.992$ 。随着磨削过程材料去除总量增加(即采样区间从 1 至 12), 中频带能量占比逐渐增大而后趋向于稳定, 低频带能量占比变化趋势与之相反。究其原因推断与微磨具由快速磨损阶段逐渐进入稳定磨损阶段有关。微磨具表层磨粒的磨损、破碎、脱落逐渐趋于动态平衡, 有效磨粒数逐渐增多, 磨粒与微槽侧壁接触面积之和也逐渐增大而后趋于稳定。而低频带和中频带能量占比之间存在极高的相关性, 这与机械振动和磨屑对微磨具及微槽侧壁的摩擦作用有关。初始磨削阶段微磨具表层磨粒突出高度不均匀, 有效磨粒数少, 磨削力不稳定振动强烈。该阶段产生的磨屑也较少, 磨屑容易排出。随着微细磨削加工的进行, 有效磨粒

数逐渐增多而后趋于稳定, 振动减小。此时磨屑增多, 磨屑对微磨具及微槽侧壁的摩擦作用会增大。因此, 低、中频带能量占比稳定时也会存在波动, 在机械振动和磨屑对微磨具及微槽侧壁的摩擦作用下两频带能量占比之和保持稳定。

### 3.5 非稳态特征与各频带能量占比关系

$a_p=200\ \mu\text{m}$  时微磨具直径损失量与中频带能量占比关系如图 17 所示。微磨具直径损失量由  $0.313\ \mu\text{m}$  快速增加至  $9.377\ \mu\text{m}$ , 而后缓慢增加至  $11.818\ \mu\text{m}$ , 与此同时中频带能量占比由 47.6 % 先快速增加至 64 % 而后趋于稳定。中频带能量占比与微磨具直径损失量呈正相关关系, 相关系数为 0.806。极高的相关性说明了微磨具圆周及端部磨粒对微槽侧壁的成型作用集中于中频带。但是这种相关性仅限于快速磨损阶段。微磨具一旦进入稳定磨损阶段, 有效磨粒数及磨粒与微槽接触面积之和就会趋于稳定。中频带能量占比也会趋于稳定, 而微磨具直径损失量依旧在增大。此外, 从图 10 中可见,  $a_p=200\ \mu\text{m}$  时采样区间 11 和 12 微磨具发生微磨具

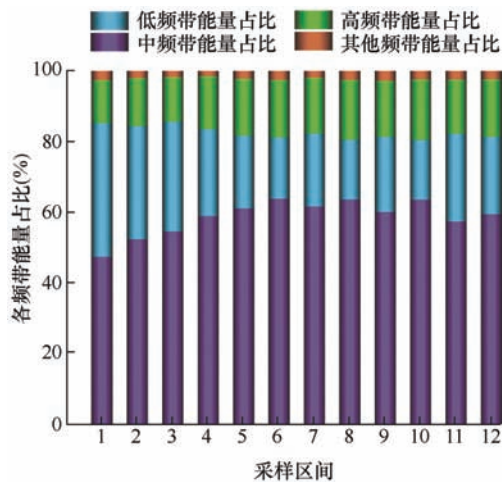


图 16 微细磨削各频带能量占比( $a_p=200\ \mu\text{m}$ )

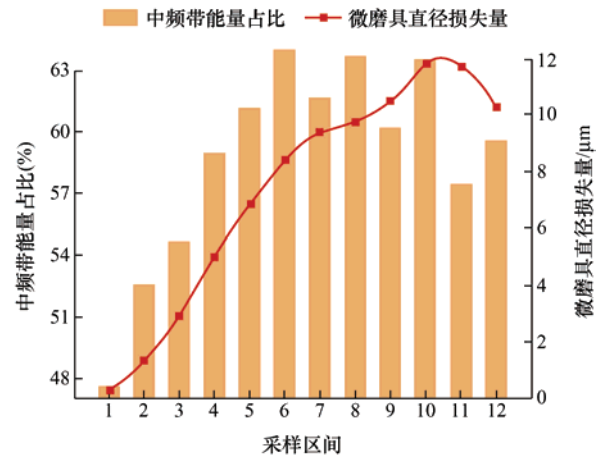


图 17 微磨具直径损失量与中频带能量占比关系图  
( $a_p=200\ \mu\text{m}$ )

挤压变形(微磨具直径损失量减小)。对应的中频带能量占比明显减小,低频带能量占比明显增大(图 16)。验证了磨屑对微磨具及微槽侧壁的摩擦作用对 AE 信号的影响,也说明磨屑的摩擦作用是集中于低频带的。

$a_p=200\ \mu\text{m}$  时微槽平均崩边宽度与高频带能量占比的关系如图 18 所示。随着材料去除总量的增加,高频带能量占比与微槽平均崩边宽度的变化趋势大致相近。当微槽平均崩边宽度由  $31.976\ \mu\text{m}$  增加至  $47.194\ \mu\text{m}$  时,高频带能量占比由 13.5% 增加至 19%。当微槽平均崩边宽度由  $48.096\ \mu\text{m}$  减小至  $36.236\ \mu\text{m}$  时,高频带能量占比由 19.2% 减小至 18.1%。高频带能量占比与微槽平均崩边宽度呈正相关关系,但相关系数仅为 0.463。相关系数低于微磨具直径损失量与中频带能量占比的相关系数,可能与 AE 信号采样区间选择和微槽平均崩边宽度计算误差有关。此外,较低的相关系数也说明微槽崩边的诱因复杂。造成微槽崩边的因素有集中于高频带的裂纹萌生和扩展、材料碎裂等,但是也有少部分集中于低频带或中频带的机械振动、磨屑摩擦等影响因素。

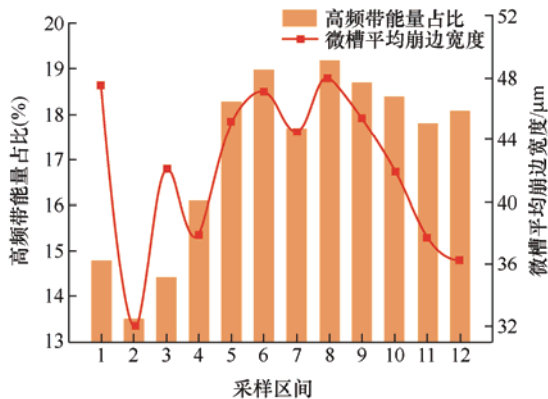


图 18 微槽平均崩边宽度与高频带能量占比关系图  
( $a_p=200\ \mu\text{m}$ )

$a_p=200\ \mu\text{m}$  时微槽锥度角与低频带能量占比的关系如图 19 所示。当微槽锥度角增大时,低频带能量占比有减小的趋势。微槽锥度角是微磨具磨削状态、磨屑排出过程等因素综合影响的结果。从前文分析可知,微磨具初始磨损阶段,微磨具振动剧烈磨损较快,低频带能量占比较大。由于机械振动和微磨具磨损剧烈,导致微槽锥度角较大,此时振动是低频带的主要特征。微磨具磨损达到一定程度后,磨屑增多导致其对微磨具及微槽侧壁的摩擦作用增强,微槽锥度角变大。微槽锥度角增大又削弱这种摩擦作用,使低频带能量占比减小。由于微槽锥度角是连续且缓慢变化的,微槽锥度角较大时,也可能存在严重的微磨具变形,磨屑黏附,磨屑的摩擦作用很强,低频带能量占比变大的情况(如区间 11、12)。

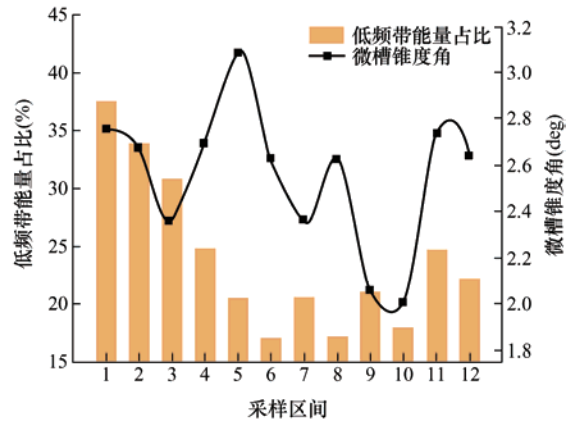


图 19 低频带能量占比与微槽锥度角关系图  
( $a_p=200\ \mu\text{m}$ )

### 3.6 磨削深度对相关系数的影响

磨削深度对频带能量占比与非稳态特征相关系数的影响如图 20 所示。磨削深度由  $50\ \mu\text{m}$  增加至  $200\ \mu\text{m}$ , 微磨具直径损失量与中频带能量占比的相关系数由 0.465 增大到 0.806, 微槽平均崩边宽度与高频带能量占比的相关系数由 0.589 减小至 0.463。磨削深度越大, 微磨具受约束越强, 振动对微磨具磨损的影响也越小, 微磨具直径损失量与中频带能量占比的相关系数会增大。磨削深度  $50\ \mu\text{m}$  和  $200\ \mu\text{m}$  时采样区间微槽崩边形貌如图 21 所示, 受微磨具振动影响, 磨削深度较小时采样区间内崩边的次数较多且连续型小崩边居多, 信号分析区间可以很好地反映采样区间地整体状况, 误差较小。而磨削深度较大时采样区间内崩边的次数相对较少且具有鳞片状大崩边, 误差会增大。因此, 随着磨削深度的增加, 微槽平均崩边宽度与高频带能量占比的相关系数有减小的趋势。此外, 磨削深度不同, 微磨具磨损情况不同, 排屑难易程度也不同, 在 AE 信号低频带和中频带范围及能量占比上也会存在一些差异。

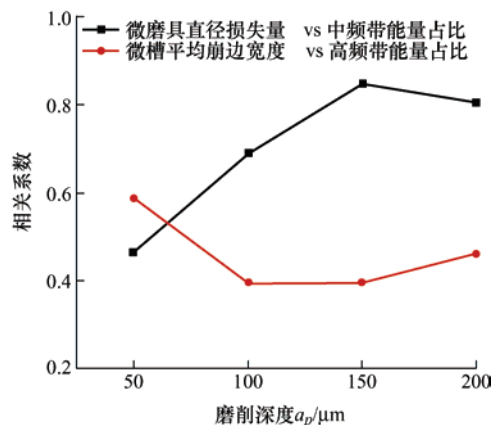
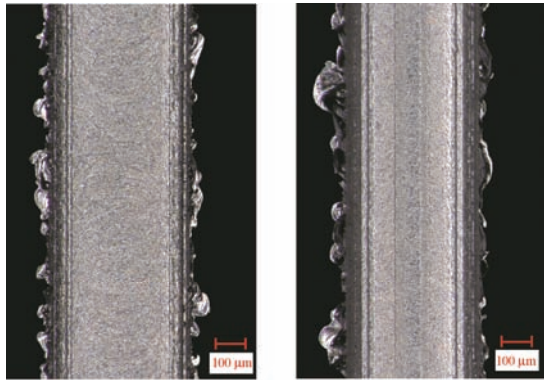


图 20 不同磨削深度下频带能量占比与非稳态特征的相关系数



(左:  $a_p=50\ \mu\text{m}$  右:  $a_p=200\ \mu\text{m}$ )

图 21 微槽崩边形貌

## 4 结论

(1) AE 信号的时域特征可以反映微槽崩边程度。 $AE_{RMS}$  值与微槽平均崩边宽度存在近似线性关系。随着微槽平均崩边宽度的增加  $AE_{RMS}$  谱从整体连续小幅震荡逐渐变为瞬时大幅震荡。

(2) 机械振动、磨屑与工件和微磨具的摩擦作用集中于 AE 信号低频带(0~62.5 kHz)。微磨具圆周及端部磨粒对微槽的成型作用集中于 AE 信号中频带(62.5~125 kHz), 中频带能量占比可以表征微磨具径向磨损程度。微槽崩边诱因复杂, 其中裂纹的萌生和扩展及材料碎裂集中于 AE 信号高频带(125~500 kHz)。高频带能量占比可以表征微槽崩边程度。

(3) 分析表明, 提出的小波包分解(WPD)和快速傅里叶变换(FFT)相结合的信号分析方法可以明确微细磨削非稳态特征主要成因的集中频段, 为后续非稳态特征成因模拟实验研究和微细磨削过程控制研究提供理论和实验依据。

## 参 考 文 献

- [1] 李伟, 周志雄, 尹韶辉, 等. 微细磨削技术及微磨床设备研究现状分析与探讨[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 10-19.  
LI Wei, ZHOU Zhixiong, YIN Shaohui, et al. Research status analysis and review of micro-grinding technology and micro-grinding machines[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(17): 10-19.
- [2] AURICH J C, KIRSCH B, SETTI D, et al. Abrasive processes for micro parts and structures[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2019, 68: 653-676.
- [3] ZHANG S J, ZHOU Y P, ZHANG H J, et al. Advances in ultra-precision machining of micro-structured

functional surfaces and their typical applications[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 142: 16-41.

- [4] 程军, 王超, 温雪龙, 等. 单晶硅微尺度磨削材料去除过程试验研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(17): 194-200.  
CHENG Jun, WANG Chao, WEN Xuelong, et al. Experimental investigation on material removal process for micro-grinding of single crystal silicon[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(17): 194-200.
- [5] AURICH J C, CARRELLA M, WALK M. Micro grinding with ultra-small micro pencil grinding tools using an integrated machine tool[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2015, 64(1): 325-328.
- [6] REN Y, LI C, LI W, et al. Study on micro-grinding quality in micro-grinding tool for single crystal silicon[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 42(JUN.): 246-256.
- [7] 高尚, 耿宗超, 吴跃勤, 等. 石英玻璃超精密磨削加工的表面完整性研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(005): 186-195.  
GAO Shang, GENG Zongchao, WU Yueqin, et al. Surface integrity of quartz glass induced by ultra-precision grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(005): 186-195.
- [8] ZHANG Tao, JIANG Feng, HUANG Hui, et al. Towards understanding the brittle-ductile transition in the extreme manufacturing[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2021, 3(2): 5-25.
- [9] LI W, REN Y, LI C, et al. Investigation of machining and wear performance of various diamond micro-grinding tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(3-4): 1-15.
- [10] CHEN S T, YEH M C. Development of an in-situ high-precision micro-hole finishing technique[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 253-264.
- [11] HSUE A W J, CHANG Y F. Toward synchronous hybrid micro-EDM grinding of micro-holes using helical taper tools formed by Ni-Co/diamond Co-deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 234: 368-382.
- [12] CAO X D, KIM B H, CHU C N. Hybrid micromachining of glass using ECDM and micro grinding[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(1): 5-10.
- [13] ZHANG J H, LI H, ZHANG M L, et al. Study on force modeling considering size effect in ultrasonic-assisted micro-end grinding of silica glass and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic[J].



- The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1-4): 1173-1192.
- [14] LI W, CHEN Q D, REN Y, et al. Hybrid micro-grinding process for manufacturing meso/micro-structures on monocrystalline silicon[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2020, 36(1): 17-26.
- [15] ROGERIO T, WENDERSON N L, PAULO R A, et al. Digital signal processing for self-vibration monitoring in grinding: A new approach based on the time-frequency analysis of vibration signals[J]. Measurement, 2019, 145: 71-83.
- [16] FENG J, KIM B S, SHIH A, et al. Tool wear monitoring for micro-end grinding of ceramic materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(11): 5110-5116.
- [17] QIN F, ZHANG L, CHEN P, et al. In situ wireless measurement of grinding force in silicon wafer self-rotating grinding process[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 154: 107550.
- [18] SUN Y, SU Z P, GONG Y D, et al. An experimental and numerical study of micro-grinding force and performance of sapphire using novel structured micro abrasive tool[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 181: 105741.
- [19] 温雪龙, 巩亚东, 程军, 等. 铝合金 Al6061 微尺度磨削力热特性试验分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(23): 165-174.
- WEN Xuelong, GONG Yadong, CHENG Jun, et al. Experimental research on force and temperature characteristics in micro-grinding Al6061[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(23): 165-174.
- [20] GU X, ZHAO Q, ZHANG J, et al. Understanding the damage evolution of sapphire under scratching from AE signals[J]. Ceramics International, 2020, 46(16): 26085-26099.
- [21] DIAS E A, PEREIRA F B, FILHO S, et al. Monitoring of through-feed centreless grinding processes with acoustic emission signals[J]. Measurement, 2016, 94: 71-79.
- [22] WANG Lihui, ROBERT X Gao. Condition monitoring and control for intelligent manufacturing[M]. London: Springer, 2006.
- [23] MEI Yiming, YU Zhonghua, YANG Zhensheng. Experimental investigation of correlation between attrition wear and features of acoustic emission signals in single-grit grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93: 2275-2287.
- [24] BI G, LIU S, SU S, et al. Diamond grinding wheel condition monitoring based on acoustic emission signals[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1054.
- [25] JEFFREY, BADGER, STUART, et al. Acoustic emission in dressing of grinding wheels: AE intensity, dressing energy, and quantification of dressing sharpness and increase in diamond wear-flat size[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture Design Research & Application, 2018, 125: 11-19.
- [26] 陈冰, 王各, 刘建明, 等. 圆弧形砂轮精密修整及其声发射在线监测技术[J]. 中国机械工程, 2017, 28(18): 2242-2249.
- CHEN Bing, WANG Ge, LIU Jianming, et al. Precision truing of arc-shaped diamond wheel and on-line monitoring of truing processes by AE signals[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 28(18): 2242-2249.
- [27] LI J, WANG X, SHEN N, et al. Modeling of acoustic emission based on the experimental and theoretical methods and its application in face grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(9-12): 1-12.
- [28] GAO Zheyu, LIN Jing, WANG Xinfeng, et al. Grinding burn detection based on cross wavelet and wavelet coherence analysis by acoustic emission signal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 68.
- [29] BHUIYAN M, CHOUDHURY I A, DAHARI M, et al. Application of acoustic emission sensor to investigate the frequency of tool wear and plastic deformation in tool condition monitoring[J]. Measurement, 2016, 92: 208-217.
- [30] SUYA P, ARUNACHALAM N, VIJAYARAGHAVAN L. Evaluation of grinding strategy for bioceramic material through a single grit scratch test using force and acoustic emission signals[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 457-469.
- [31] ALEXANDRE F A, LOPES W N, DOTTO F L, et al. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96: 67-79.
- [32] AULESTIA M, AGUIAR P, JUNIOR P O, et al. Low-cost piezoelectric transducer for ceramic grinding monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17):

- 7605-7612.
- [33] HAN L, LI C, GUO S, et al. Feature extraction method of bearing AE signal based on improved FAST-ICA and wavelet packet energy[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2015, 62-63: 91-99.
- [34] 温雪龙, 巩亚东, 程军, 等. 电镀金刚石微磨具磨损机理分析与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(11): 177-185.
- WEN Xuelong, GONG Yadong, CHENG Jun, et al. Mechanism analysis and experimental research on wear of electroplated diamond micro-grinding tool[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(11): 177-185.
- [35] LI W, REN Y, LI C, et al. Investigation of machining and wear performance of various diamond micro-grinding tools[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106(3-4): 1-15.
- [36] MALKIN S, HWANG T W. Grinding mechanisms for ceramics[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1996, 45(2): 569-580.
- 
- 作者简介:** 张学学, 男, 1998 年出生。主要研究方向为难加工材料微细磨削技术。  
E-mail: 2477033981@qq.com
- 任莹晖(通信作者), 女, 1979 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为难加工材料精密超精密加工技术。  
E-mail: rebecca\_ryh@163.com
- 杨伟程, 男, 1996 年出生, 硕士。主要研究方向为难加工材料微细磨削技术。  
E-mail: 1193588414@qq.com
- 李伟, 男, 1983 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为难加工材料高效精密加工技术及智能机床装备。  
E-mail: liweihnu123@sina.com
- 于康宁, 女, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为机器视觉。  
E-mail: ykangning130121@163.com