

DOI: 10.3901/JME.2010.13.192

# 单晶硅二维超声振动辅助磨削技术的实现\*

梁志强<sup>1,2</sup> 王西彬<sup>1</sup> 吴勇波<sup>2</sup> 赵文祥<sup>1</sup> 彭云峰<sup>3</sup> 许卫星<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;

2. 秋田县立大学系统科学技术学部 秋田 0150055 日本;

3. 厦门大学机电工程系 厦门 361005)

**摘要:** 基于超声振动磨削能有效提高加工效率及加工表面质量的特性, 通过设计具有伸缩和弯曲两种模态的压电陶瓷椭圆振子, 实现了单晶硅二维椭圆振动磨削技术。对超声振子的振动特性进行检测, 证实改变压电陶瓷两电极之间的交流信号相位差和电压幅值, 可得到不同形状和振幅的椭圆振动。对单晶硅进行超声磨削与普通磨削的对比试验, 结果表明二维振动磨削的磨削力大幅降低, 表面粗糙度显著减小, 表面质量明显提高, 加工表面延性域去除比例增加。从而证实二维超声振动磨削方法能够实现高效率高质量单晶硅加工。

**关键词:** 椭圆超声振动 磨削 单晶硅 磨削力 表面粗糙度

**中图分类号:** TG156

## Development of a Two-dimensional Ultrasonic Vibration Assisted Grinding Technique of Monocrystal Silicon

LIANG Zhiqiang<sup>1,2</sup> WANG Xibin<sup>1</sup> WU Yongbo<sup>2</sup> ZHAO Wenxiang<sup>1</sup>  
PENG Yunfeng<sup>3</sup> XU Weixing<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Vehicular, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University, Akita 0150055, Japan;

3. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

**Abstract:** Based on the characteristics of higher machining efficiency and higher surface quality of ultrasonic vibration grinding, a two-dimensional ultrasonic vibration grinding of monocrystal silicon technique is achieved by designing elliptical vibrator with longitudinal mode and bending mode. The measurement results on the vibration characteristics of vibrator show that shape and amplitude of elliptical vibration can be modulated by changing voltage amplitude and phase difference between the piezoelectric ceramics electrodes. The grinding experimental results show that under the elliptic ultrasonic vibration assistance, grinding forces are reduced largely, the surface roughness is decreased significantly, the surface quality is improved obviously, and moreover the percentage of ductile-mode removal material increases. These indicate that high efficiency and high surface quality machining of monocrystal silicon can be achieved with elliptic vibration assisted grinding.

**Key words:** Elliptical ultrasonic vibration Grinding Silicon Grinding force Surface roughness

## 0 前言

随着科学技术的不断发展, 硬脆性材料单晶硅在半导体、太阳能电池、光学窗口材料等领域的应用日益广泛。目前单晶硅晶片主要通过磨削和化学机械抛光方法得到。但是传统的磨削中产生较大的磨削力以及较高的磨削温度, 导致严重的砂轮的磨损和加工表面的损伤, 这也增加了后序精加工的成本, 降低了加工效率<sup>[1-3]</sup>。因此迫切需要新的加工手段提高单晶硅加工效率以及加工质量。

超声振动磨削作为一种可靠的加工技术, 已被

\* 国防科研资助项目(62301090103)。20090710 收到初稿, 20100302 收到修改稿

广泛应用到硬脆性材料的加工中<sup>[4-5]</sup>。一维轴向振动磨削，即砂轮或工件的振动方向平行于砂轮轴向，以较大幅度提高表面质量和降低表面热载荷为主要特点。DENKENA 等<sup>[6]</sup>研究表明，轴向振动磨削的加工表面质量提高，并且加工表面磨削沟槽尺寸减小。TAWAKOLI 等<sup>[7]</sup>对 42CrMo<sub>4</sub> 合金材料进行干式轴向振动磨削，证实表面粗糙度降低，法向磨削力减小，表面热损伤也减小。UHLMANN<sup>[8]</sup>指出，轴向超声振动磨削中磨粒切削刃与工件永久接触，可用于高精度复杂形状零件加工。与一维轴向振动磨削相比，一维径向振动磨削，即振动方向垂直于工件表面，能够显著减小磨削力以及提高加工效率，但是会导致砂轮磨损的加剧和表面粗糙度的轻微增加<sup>[9]</sup>。UHLMANN<sup>[8]</sup>进行了单颗磨粒划擦试验，证实径向超声振动导致未变形切屑厚度增加，单个切屑长度减小，磨削力大幅度降低并且材料去除率增加，而未产生较大比例的亚表面损伤。由此看出，径向磨削主要优点为材料加工效率提高，而轴向磨削主要优势为工件表面质量提高。

为充分利用超声振动的加工优势，YAN 等<sup>[10]</sup>对纳米 ZrO<sub>2</sub> 进行二维振动磨削试验研究，采取对工件施加平行于工件平面的二维超声振动方法，结果证实二维振动磨削能够显著提高工件表面质量。鈴木清等<sup>[11]</sup>提出垂直于工件平面的椭圆振动磨削技术，其超声振动的一个方向为垂直于工件平面方向，另一个为平行于磨削速度方向，试验证实该椭圆振动磨削材料去除率显著提高，磨削力大幅度减小，而工件表面粗糙度未有明显改变。

在本研究中，为了高效率高质量加工单晶硅，提出一种新的超声椭圆振动磨削(Elliptic ultrasonic assisted grinding, EUAG)方法，在磨削过程中对工件同时施加砂轮轴向和砂轮径向的超声振动。文中对该方法的有效性进行分析，主要研究内容包括二维超声磨削设计，进行有无超声振动的对比磨削试验，研究超声振动对加工中磨削力以及工件表面粗糙度的影响，采用扫描电镜检测加工创成表面，评价加工效果。

### 1 二维超声磨削系统原理

二维超声振动磨削系统主要由超声振子，波函数发生器，功率放大器以及相应夹具组成，其原理与构成如图 1 所示。椭圆振子与夹具组成磨削振动单元，经 3 向 Kistler 测力计，固定在平面磨床工作台电磁吸盘上，用石蜡将单晶硅薄片粘贴在振子的顶端面上。当超声振子的椭圆振动被激励，

二维超声振动被施加到工件，分别沿着砂轮径向和砂轮轴向。在一次磨削加工过程中，砂轮磨削深度为  $a_p$ ，工作台以速度  $v_f$  作进给运动，同时砂轮以线速度  $v_s$  旋转。

如图 2 所示，将  $Oxyz$  坐标固定在工件上，取砂轮上磨粒  $P$  作为参考，初始时刻  $t=0$  s 时，磨粒  $P$  位于砂轮最底端。普通磨削时单颗磨粒  $P$  相对于工件的运动方程为

$$\begin{cases} x(t) = v_f t + R \cos(2\pi f_1 t - \pi/2) \\ z(t) = R + R \sin(2\pi f_1 t - \pi/2) \end{cases} \quad (1)$$

椭圆振动磨削时单颗磨粒  $P$  相对于工件的运动轨迹为

$$\begin{cases} x(t) = v_f t + R \cos(2\pi f_1 t - \pi/2) \\ y(t) = -L_A \sin(2\pi f t + \pi/2) \\ z(t) = R + R \sin(2\pi f_1 t - \pi/2) + L_B \sin 2\pi f t \end{cases} \quad (2)$$

- 式中  $R$  ——砂轮半径  
 $f_1$  ——砂轮转动频率  
 $f$  ——超声振动频率  
 $L_A$  ——工件在砂轮轴向的振动振幅  
 $L_B$  ——工件在砂轮径向的振动振幅

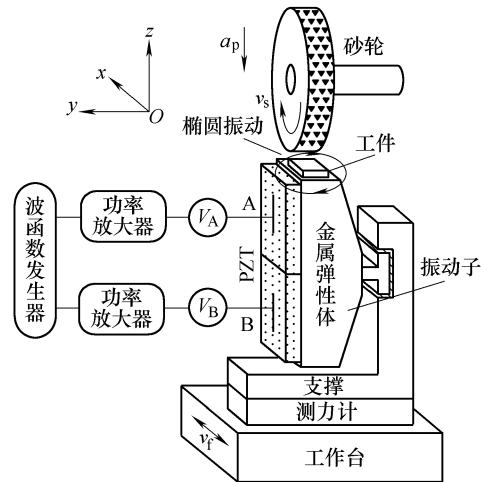


图 1 磨削试验原理示意图

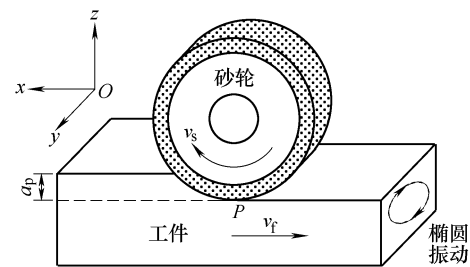


图 2 磨削坐标系示意图

图 3a 表示磨粒在无超声、径向振动磨削、轴向振动磨削、椭圆振动磨削 4 种情况下运动轨迹(模拟条件:  $f_1=20$  Hz,  $f=40$  kHz,  $v_f=1$  mm/s,  $R=90$  mm,

$a_p=10\ \mu\text{m}$ 。普通磨削： $L_A=0\ \mu\text{m}$ ， $L_B=0\ \mu\text{m}$ 。径向磨削： $L_A=0\ \mu\text{m}$ ， $L_B=1\ \mu\text{m}$ 。轴向超声振动： $L_A=2\ \mu\text{m}$ ， $L_B=0\ \mu\text{m}$ 。椭圆磨削： $L_A=2\ \mu\text{m}$ ， $L_B=1\ \mu\text{m}$ ）。普通磨削的磨粒轨迹为一条单向简单弧线，而椭圆振动磨削的磨粒轨迹为空间螺旋曲线。椭圆振动磨削的磨粒轨迹在  $xz$  平面内的投影曲线如图 3b 所示，其与一维径向振动磨削的磨粒轨迹重合，磨粒切削深度呈周期性变化。椭圆螺旋轨迹在  $xy$  平面的投影如图 3c 所示，其与一维轴向振动磨削的磨粒轨迹重合且呈正弦曲线状，磨粒的切削轨迹变长。

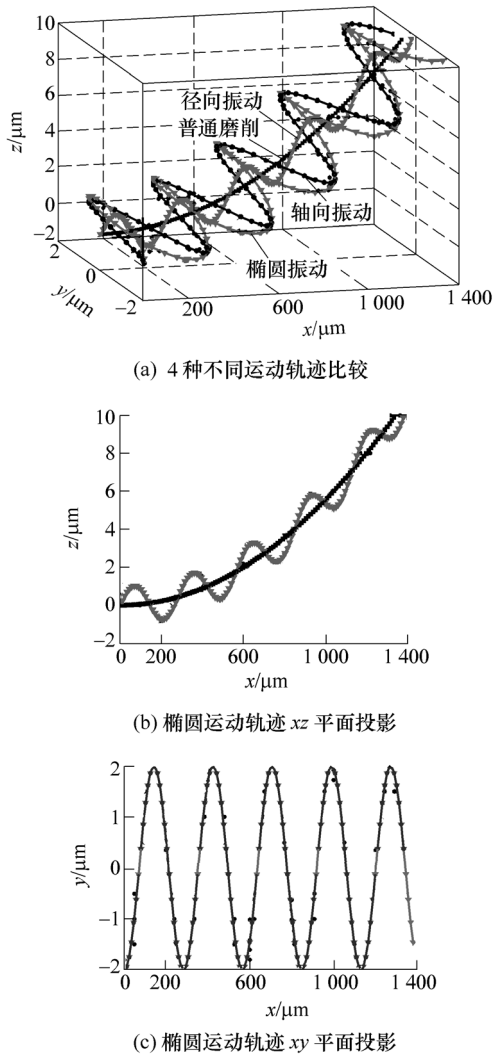


图 3 4 种加工情况下单颗磨粒运动轨迹

## 2 超声振动装置的设计

### 2.1 超声振子的工作原理

超声振动单元的工作原理如图 4 所示。振子由压电陶瓷块与金属弹性体黏合而成，经绝缘垫用螺栓将其固定在支撑上。当波函数发生器输出两个相位差为  $\psi$  的交流电压信号，经功率放大器放大后，

施加到压电陶瓷的两个电极(A, B)上，振子的伸缩和弯曲模态被同时激励，由此导致振子产生纵向和横向两个方向的超声振动，其振动合成为椭圆振动。

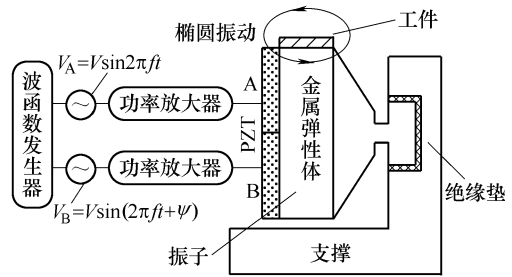


图 4 超声振动单元工作原理图

### 2.2 超声振子的模态分析

对于一个长为  $l$ ，宽为  $b$ ，厚度为  $t$  的板状体(图 5)，它的弯曲和伸缩模态公式可表达如下<sup>[12]</sup>

$$U_B(x) = \bar{U}_B \{ (\cosh \lambda l - \cos \lambda l) (\cosh \lambda x + \cos \lambda x) - (\sinh \lambda l + \sin \lambda l) (\sinh \lambda x + \sin \lambda x) \} \quad (3)$$

$$U_L(x) = \bar{U}_L \cos(r\pi x/l) \quad (4)$$

式中， $U_B(x)$  和  $U_L(x)$  分别是质点  $x$  在弯曲和伸缩两个振动模态下的位移； $\bar{U}_B$  和  $\bar{U}_L$  分别是两种振动的振幅。 $\lambda l$  由式(5)确定

$$1 - \cosh \lambda l \cos \lambda l = 0 \quad (5)$$

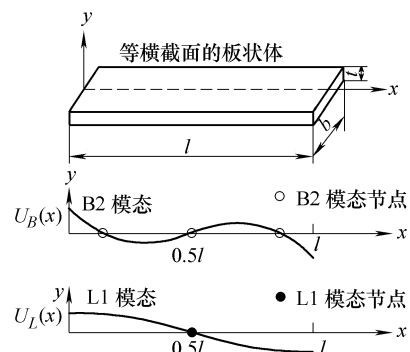


图 5 超声振动模态和节点示意图

将式(5)中的第  $n$  个解代入式(3)，计算成  $n$  阶弯曲振动模态，并将其代入式(4)，得到  $r$  阶伸缩振动模态。

当弯曲振动(B2)模态  $n=2$  和伸缩振动(L1)模态  $r=1$  时，两种振动模态某时刻质点位移如图 5 所示。当  $U_B(x)$  和  $U_L(x)$  的  $y$  轴坐标值为 0 时，位于  $x$  轴上的点为弯曲振动和伸缩振动的节点。文中振子模态选择 B2 模态和 L1 模态，即两种模态在板体中间位置有共同的节点，实际应用中在板体中间位置进行装夹，以减轻对超声振动的影响。

为使振子具有二维超声振动，将两个交流电压信号同时输入到 PZT 的电极 A 和电极 B 上。假设

两个交流信号，电压幅值  $V$  和频率  $f$  相同，其相位差为  $\psi$ ，则两个交流信号可由式(6)表示

$$V_A(t) = V \sin 2\pi f t \tag{6}$$

$$V_B(t) = V \sin(2\pi f t + \psi) \tag{7}$$

当频率  $f$  接近振子 L1 和 B2 两个模态的振动频率时，PZT 两种模态的超声振动被激励，促使金属弹性体产生二维超声振动。鉴于超声振动的振幅与电压幅值成一定比例，假设由电压  $V_A$  激励产生的伸缩振动为  $x_A$ ，弯曲振动为  $y_A$ ；由电压  $V_B$  激励产生的伸缩超声振动为  $x_B$ ，弯曲振动为  $y_B$ ，不同的振动可表示如下

$$x_A = K_{xA} V_A(t) = K_{xA} V \sin 2\pi f t \tag{8}$$

$$y_A = K_{yA} V_A(t) = K_{yA} V \sin(2\pi f t + \psi) \tag{9}$$

$$x_B = K_{xB} V_B(t) = K_{xB} V \sin 2\pi f t \tag{10}$$

$$y_B = K_{yB} V_B(t) = K_{yB} V \sin 2\pi f t \tag{11}$$

式中， $K_{xA}$ ,  $K_{xB}$ ,  $K_{yA}$ ,  $K_{yB}$  是比例系数。

由  $V_A$  和  $V_B$  产生的伸缩和弯曲振动的位移合成可表示为

$$x = x_A + x_B = K_{xA} V \sin 2\pi f t - K_{xB} V \sin 2\pi f t \tag{12}$$

$$y = y_A + y_B = K_{yA} V \sin(2\pi f t + \psi) + K_{yB} V \sin 2\pi f t \tag{13}$$

进一步简化，可表示为

$$x = a \sin(2\pi f t + \alpha) \tag{14}$$

$$y = b \sin(2\pi f t + \beta) \tag{15}$$

$$a = V \sqrt{K_{xA}^2 - 2K_{xA}K_{xB} + K_{xB}^2} \tag{16}$$

$$b = V \sqrt{K_{yA}^2 - 2K_{yA}K_{yB} + K_{yB}^2} \tag{17}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{K_{xB} \sin \psi}{K_{xA} - K_{xB} \sin \psi}\right) \tag{18}$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{K_{yB} \sin \psi}{K_{yA} + K_{yB} \sin \psi}\right) \tag{19}$$

该二维振动合成后运动方程表示为

$$\frac{x^2}{a^2} - 2\frac{xy}{ab} \cos(\beta - \alpha) + \frac{y^2}{b^2} = \sin^2(\beta - \alpha) \tag{20}$$

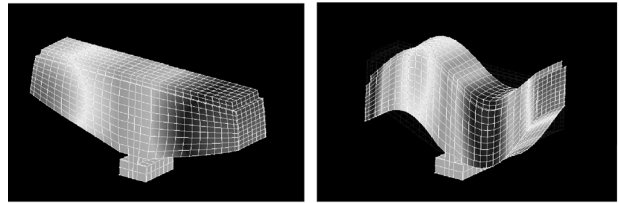
当  $\beta - \alpha = 0^\circ$  或  $180^\circ$  时，板状体端面上某一点的振动轨迹为一条直线。当  $\beta - \alpha = 90^\circ$  时，质点振动轨迹为标准椭圆，其运动公式为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \tag{21}$$

### 2.3 超声振子的尺寸设计

为使超声振子满足刚性和强度要求，振子的截面形状设计为梯形结构，如图 4 所示。通过有限元软件 FEMAP 9.3 和频率响应分析软件 PIEZO plus 4.0，确定 L1B2 型振子的详细尺寸。图 6 为振子伸缩和弯曲模态结果。利用频率响应分析软件模拟振子的振动情况，当输入电压幅值 50 V，频率 21.6 kHz，相位差  $90^\circ$ ，超声振子产生如图 7 所示的

椭圆振动。



(a) L1 模态 ( $f_{L1} = 21.6145 \text{ kHz}$ ) (b) B1 模态 ( $f_{B1} = 21.6139 \text{ kHz}$ )

图 6 弯曲和伸缩模态的频率分析

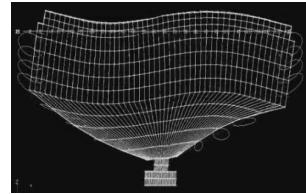


图 7 椭圆振动模拟图

振子实物图如图 8 所示，由于有限元仿真与制造误差存在，需测量验证其有效模态频率。经阻尼分析仪器测量，结果如图 9 所示，振子伸缩模态共振频率为 21.871 kHz，反共振频率为 21.902 kHz；弯曲模态共振频率为 21.885 kHz，反共振频率为 21.909 kHz。超声振子两模态的共振频率非常近似，符合理论分析结果。因超声振子在两个反共振点处模态阻尼值分别达到最大，当对振子输入一定的电压时所消耗的功率最小，所以试验中采用靠近反共振点频率的交流电压信号。

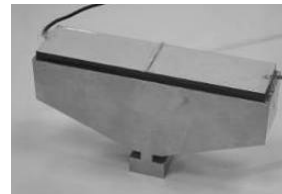


图 8 振子照片

### 2.4 超声振子振动特性的确定

椭圆振动的振幅大小和形状随电压幅值、频率、相位差的改变而不同。测定装置如图 10 所示，该测量系统主要由激光多普勒振动计 LV-1610 以及速度矢量合成转化器组成。交流电压信号由波函数发生器输出并经功率放大器放大后，输入到 PZT 两个电极 A 和 B。激光多普勒振动计的信号输入到速度矢量转化器，将质点两个方向的振动位移进行合成，合成后的信号输入数字示波器。图 11 表明椭圆振动形状随着相位差的不同而改变，其中  $L_A$  和  $L_B$  分别代表椭圆振动的弯曲振动和伸缩振动的振幅。当相位差为  $0^\circ$  或者  $180^\circ$  时，振动轨迹为一条直线；当相位差为  $90^\circ$  时，振动轨迹为近似标准的椭圆，

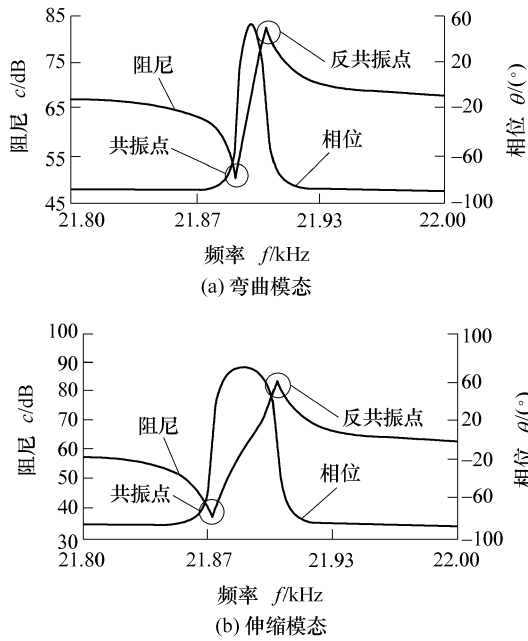


图 9 振子的频率阻尼特性

这与理论推导基本一致。图 12 表明振动振幅随着输入电压幅值的增加而增大。

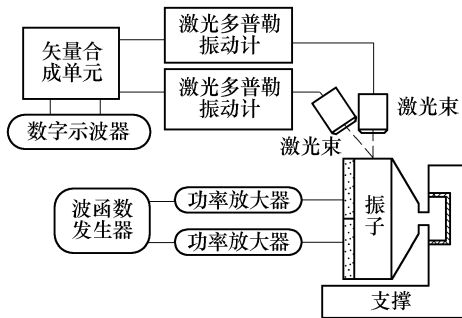


图 10 椭圆振动轨迹的测量装置示意图

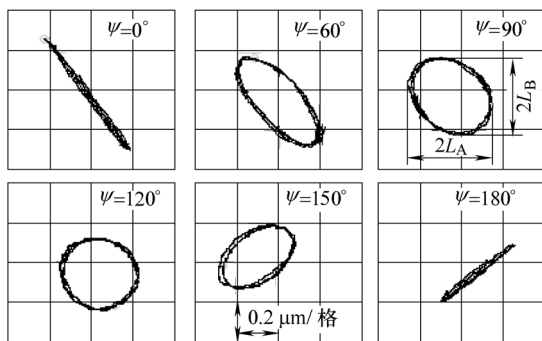


图 11 相位差对椭圆振动的影响( $V=25\text{ V}$ ,  $f=21.95\text{ kHz}$ )

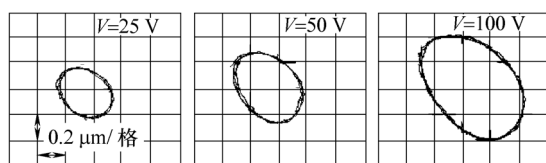


图 12 电压幅值对椭圆振动的影响( $\psi=90^\circ$ ,  $f=21.95\text{ kHz}$ )

### 3 磨削试验与结果

#### 3.1 试验条件

有无超声振动的对比磨削试验在 CNC 平面磨床 SGT-315RPA 上进行。工件采用应用较广泛的单晶硅材料(结晶面 100)，其导电类型为 p 型，其主要物理参数如下表所示。试验装置如图 13 所示，工件尺寸  $12\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ ，用石蜡粘贴于振子上端面。金刚石砂轮型号为 SDC400N180 $\times$ 15 $\times$ 75。试验为干式磨削，振子输入电压频率为 21.95 kHz，相位差  $\psi=90^\circ$ ，超声振幅大小如图 12 所示。加工中磨削力由 3 向 Kistler 测力计测量，工件表面粗糙度结果由轮廓仪 Surfcom408A 测量，工件表面质量采用扫描电镜 SM-200 检测评价。

表 单晶硅(100)材料主要物理参数

参数	数值	参数	数值
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.33	硬度 HV/GPa	850
熔点 $t/^\circ\text{C}$	1 414	断裂韧性 $K_{IC}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	0.95
晶格常数 $a/\text{nm}$	0.357 1	泊松比 $\nu$	0.273
热膨胀系数 $C/\mu\text{K}$	3.43	屈服强度 $\delta_0/\text{GPa}$	3.35
弹性模量 $E/\text{GPa}$	193	切变模量 $G/\text{GPa}$	63.7

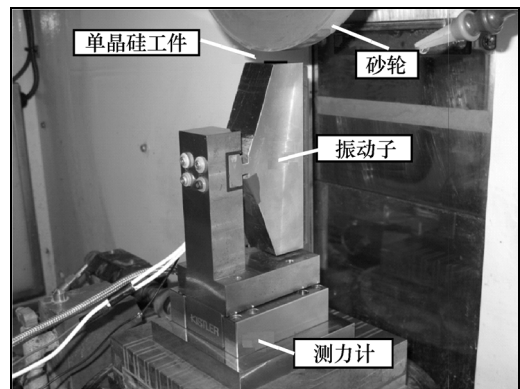


图 13 磨削试验装置

#### 3.2 椭圆振动对磨削力的影响

在不同的磨削深度条件下超声振动磨削和普通磨削(Conventional grinding, CG)的磨削力如图 14 所示，磨削力都随着切削深度的增加而增大，其中  $F_n$  表示法向磨削力， $F_t$  表示切向磨削力。两种磨削方法的切向磨削力都远远小于法向磨削力，这与单晶硅材料的本身性质有关。由于单晶硅属于典型的硬脆材料，硬度较大，所以磨削力比( $F_n/F_t$ )相对较大。从图 14 中还可以看出，超声磨削的磨削力明显小于普通磨削的磨削力，法向磨削力减小比例更大，可达到 30%。由此可知，超声加工时磨削力大幅度减小，可通过增加磨削深度的方法，提高磨削加工效率。

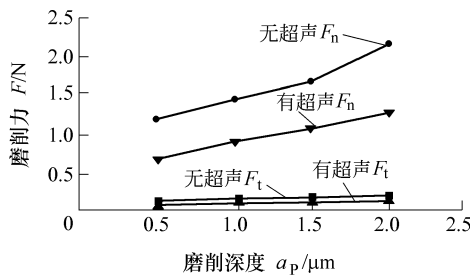


图14 磨削深度与磨削力的关系  
( $v_s=30\text{ m/s}$ ,  $v_f=40\text{ mm/min}$ ,  $V=50\text{ V}$ )

在一次磨削过程中改变交流电压幅值所获得的磨削力信号如图15所示,普通磨削在施加超声振动( $V=50\text{ V}$ )以后,磨削力明显减小。轴向力 $F_a$ 很小,趋于零。当电压从 $50\text{ V}$ 增加到 $100\text{ V}$ 时,超声振动的振幅增大,磨削力进一步减小。这与振动振幅增大时磨粒相对工件的速度和加速度极剧增加有关。当磨粒的加速度增加时,磨粒在极短时间内对工件材料有巨大的脉冲冲击力,在切削微观区域有局部高温软化作用,材料的可磨削性相对提高,由此导致磨削力大幅减小。

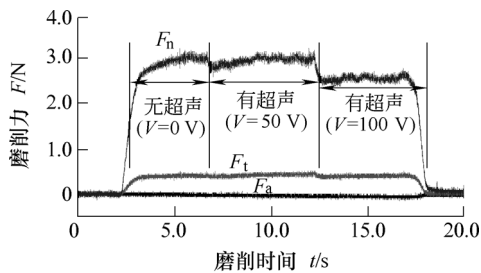


图15 振动振幅与磨削力的关系  
( $a_p=2\text{ }\mu\text{m}$ ,  $v_s=20\text{ m/s}$ ,  $v_f=100\text{ mm/min}$ )

### 3.3 椭圆振动对工件表面质量的影响

不同磨削深度条件下表面粗糙度结果如图16所示,尽管超声振动磨削和普通磨削的表面粗糙度都随着磨削深度的增加而增加,但是超声磨削的表面粗糙度明显改善。在较小的切削深度( $0.5\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$ )情况下,表面粗糙度增加幅度基本相似,在较大切削深度( $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ )情况下,无超声的表面粗糙度明显增大,而超声磨削的表面粗糙度增大趋势变缓。磨削后工件表面照片如图17所示,普通磨削工件表面有许多脆性断裂、凹坑和较大表面裂纹,存在大量明显的切削沟槽。超声磨削工件表面几乎为延性域去除,仅有少量脆性断裂,切削沟槽明显变浅,表面光滑。因此超声磨削提高了加工表面质量。

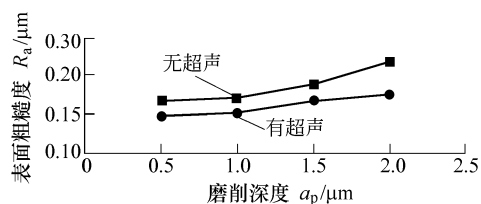
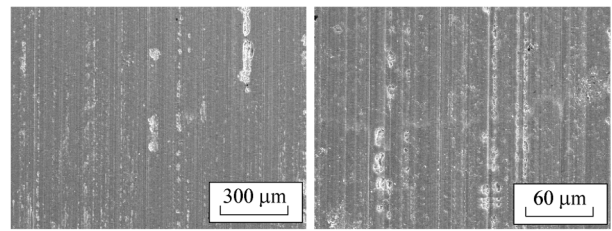
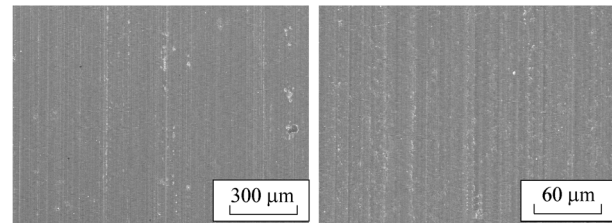


图16 磨削深度与表面粗糙度的关系  
( $v_s=30\text{ m/s}$ ,  $v_f=40\text{ mm/min}$ ,  $V=50\text{ V}$ )



(a) 普通磨削 ( $V=0\text{ V}$ )



(b) 超声振动磨削 ( $V=50\text{ V}$ )

图17 磨削表面扫描电镜照片  
( $v_s=30\text{ m/s}$ ,  $a_p=0.5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $v_f=20\text{ mm/min}$ )

## 4 结论

(1) 与普通磨削相比,椭圆振动磨削的法向磨削力和切向磨削力都减小,而且法向磨削力减小比例更大,可达30%。当椭圆振动振幅增加时,磨削力进一步减小。因此实际超声磨削加工中,可适当增加磨削深度来提高加工效率。

(2) 在普通磨削和超声磨削中,表面粗糙度都随切削深度的增加而增大,但是椭圆振动磨削的表面粗糙度明显优于普通磨削的表面粗糙度,尤其在切削深度较大时,表面粗糙度改善显著。

(3) 椭圆振动磨削的加工表面质量明显提高。超声磨削表面光滑,有较少的表面裂纹和脆性断裂,工件材料的延性域去除比例增加。

本研究表明二维椭圆振动磨削方法能够实现硬脆性单晶硅材料的高效率高质量加工。

### 参 考 文 献

[1] 郭东明, 康仁科, 苏建修, 等. 超大规模集成电路制造中硅片平坦化技术的未来发展[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 100-105.  
GUO Dongming, KANG Renke, SU Jianxiu, et al. Future development on wafer planarization technology in ulsi fabrication[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(10): 100-105.

[2] KAHN H, TROYER M J, PRABHU V R. Single crystal silicon as micromechanical material[J]. Integrated Thin

- Films and Applications, 1998, 86: 119-124.
- [3] BARTNITSKAYA T S, VLASOVA M V, ZELYAYSKII V B. Defect structure formation in silicon on grinding[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1992, 31: 903-907.
- [4] PEI Z J, FERREIRA P M. Modeling of ductile-mode material removal in rotary ultrasonic machining[J]. Int. J. Mach. Tools Manuf., 1998, 38: 1 399-1 418.
- [5] PEI Z J, FERREIRA P M. An experimental investigation of rotary ultrasonic face milling[J]. Int. J. Mach. Tools Manuf., 1999, 39: 1 327-1 344.
- [6] DENKENA B, FRIEMUTH T, REICHSTEIN M. Potentials of different process kinematics in micro grinding[J]. Annals of the CIRP, 2003, 52: 463-466.
- [7] TAWAKOLI T, AZARHOUSHANG B. Ultrasonic assisted dry grinding of 42CrMo4[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2009, 42: 883-891.
- [8] UHLMANN E. Surface formation in creep feed grinding of advanced ceramics with and without ultrasonic assistance[J]. Annals of the CIRP, 1998, 47: 249-252.
- [9] MULT H C, SPUR G, HOLL S E. Ultrasonic assisted grinding of ceramics[J]. J. Mater. Process. Technol., 1996, 62: 287-293.
- [10] YAN Yanyan, ZHAO Bo, LIU Junli. Ultraprecision surface finishing of nano-ZrO<sub>2</sub> ceramics using two-dimensional ultrasonic assisted grinding[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2009, 43: 5-6.
- [11] 鈴木清, 蒔崎剛, 植松哲太郎, 等. 超音波楕円振動研削の研究-第二報: 定圧研削特性[J]. 砥粒加工学会誌, 1998, 42(11): 496-501.
- SUZUKI K, MAKIZAKI T, UEMATSU T, et al. Study on ultrasonic elliptical vibration grinding: 2nd report characteristics of constant pressure grinding[J]. Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, 1998, 42(11): 496-501.
- [12] 国枝正春. 实用機械振動学[M]. 東京: 理工学社, 1988.
- KUNIEDA M. Practical vibration theory[M]. Tokyo: Rikougaku-sha Publication, 1988.
- 
- 作者简介: 梁志强(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士研究生。主要研究方向为难加工材料磨削和超声振动磨削。  
E-mail: liangdjx@yahoo.com
- 王西彬, 男, 1958 年出生, 博士后, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进切削磨削、精密微小型制造、绿色制造、生物加工与成形。  
E-mail: cutting0@bit.edu.cn
- 吴勇波, 男, 1961 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为无心磨削、超声波辅助磨削和研磨技术、磁流体抛光技术。  
E-mail: wuyb@akita-pu.ac.jp
- 赵文祥, 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为难加工材料切削磨削和先进加工技术的理论与方法。  
E-mail: zhaowx@bit.edu.cn