

DOI: 10.3901/JME.2018.13.208

# 多线往复式线锯切割中单位长度材料去除量的理论分析与试验研究\*

林志树<sup>1,2</sup> 黄 辉<sup>1</sup> 郑生龙<sup>1</sup>

(1. 华侨大学制造工程研究院 厦门 361021;

2. 厦门理工学院机械与汽车工程学院 厦门 361024)

**摘要:** 线锯切割被广泛地应用于光伏和微电子行业及其他硬脆材料的切割加工, 所切晶片的质量影响后续研抛等工序的加工。建立了多线线锯往复运动与进给运动的理论模型, 提出单位长度材料去除量的概念, 推导出多线往复线锯切割中, 单位长度材料去除量随加工位置变化的理论模型。理论分析了单片用线量及进给速比对单位长度材料去除量的影响规律。以蓝宝石晶棒为锯切研究对象, 进行了不同的锯丝单片用线量以及不同进给速比条件下的锯切试验, 测量了切割片的加工质量。研究结果表明, 多线往复式切割过程中, 单位长度材料去除量随加工过程有明显的变化, 单片用线量及进给速比对单位长度材料去除量有明显的影响, 单位长度材料去除量对线锯切割质量有着显著的影响。

**关键词:** 多线线锯; 单片用线量; 进给速比; 加工质量; 单位长度材料去除量

**中图分类号:** TH161

## Theoretical Analysis and Experimental Study on Material Removal Per Length of Wire in the Cutting of Multi-wire Saw with Reciprocating

LIN Zhishu<sup>1,2</sup> HUANG Hui<sup>1</sup> ZHENG Shenglong<sup>1</sup>

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024)

**Abstract:** Wire saw is widely used in wafers sawing in the photovoltaic and microelectronics industries, it also widely applied to cut other brittle materials. The quality of sawn wafer plays an important role in the subsequent machining process such as grinding and polishing. Theoretical models about reciprocating motion and feed motion of multi-wire saw are established, concept of material removal per length of wire is proposed, theoretical model about the material removal per length of wire versus cutting position are deduced. The influences of wire consumption length of a piece of wafer and feed speed ratio on the material removal per length of wire are analyzed theoretically. Sapphire ingot sawing experiments is carried out with various wire consumption lengths of a piece of wafer and feed rate ratios. The wafer qualities were measured. The experimental result showed that material removal per length of wire is different during the whole multi-wire sawing process. The material removal per length of wire is obviously influenced by the wire consumption length of a piece of wafer and feed rate ratio. The material removal per length of wire also had a significant effect on sawn quality.

**Key words:** multi-wire saw; wire consumption length of a piece of wafer; feed rate ratio; sawn quality; material removal per length of wire

## 0 前言

线锯切割技术被广泛地应用在锯切半导体、单晶硅、多晶硅、氧化物半导体、磁性材料、硬碎材

料等领域<sup>[1-2]</sup>。相关材料的晶棒经切片、研磨、导角、清洗、退火、铜抛、化学抛光、清洗、包装等工艺流程被加工成所需晶片。线锯加工作为加工流程的第一道工序, 有着重要的作用, 据不完全统计, 切片工序成本约占整个工艺流程总成本的30%左右, 同时好的切片质量有利于后续的研磨、抛光工艺的加工, 因此对切片工序的研究显得尤为重要。

\* 国家自然科学基金资助项目(51375179, U1305241, 51375412)。20170911收到初稿, 20180214收到修改稿

早期的切片线锯加工出现于 20 世纪 90 年代,这期间主要运用游离磨料线锯加工<sup>[3]</sup>,最近固结金刚石线锯已替代游离磨料线锯成为难加工材料的主要加工工具并且能提高效率<sup>[4]</sup>。固结金刚石线锯分单线式和多线式两种,多线式线锯由于一次可切割多片晶片,加工效率高,已成为切割加工方式的主流<sup>[5]</sup>。近些年来,关于多线线锯切割的研究取得了一些进展。LIEDKE 等<sup>[6]</sup>建立了一种线锯切割过程的宏观分析模型,分析了线锯速度、进给速度、张紧力、切割长度等参数对锯切力及线的弯曲的影响。TEOMETE 等<sup>[7]</sup>对固结线锯切片过程中晶片的大波纹度产生进行研究,认为晶片上的大波纹度是由于锯丝上的磨粒偏向切削造成,锯丝换向时张紧力的变化使晶片上的线痕呈锯齿状。王建臣等<sup>[8]</sup>以硅材多线切割的温度场为研究对象,在分析硅片多线切割工作原理的基础上,建立了数值分析模型,充分考虑了切割发热机理以及空气与切削液的冷却作用。刘永等<sup>[9]</sup>采用中心复合设计试验法对碳化硅晶片超声振动复合加工过程进行研究,建立了切割力和表面粗糙度与主要工艺参数的二阶关系模型,通过工艺参数优化,获得了提高晶片表面质量的最佳工艺参数。KIM 等<sup>[10]</sup>在多线线锯切割蓝宝石研究中,发现锯丝的磨损会造成不同位置切片平均厚度、表面粗糙度等切片质量的变化。从以上的分析可以看出,学者们多集中在工艺参数对加工过程及加工质量的影响研究,而对于线锯的加工运动过程缺乏相关的报道。多线往复式线锯加工的运动与普通磨粒加工的运动方式有较大的差别,导致其加工工艺参数多,过程复杂。

本文以多线线锯加工为研究对象,建立了线锯往复运动与进给运动的理论模型,提出了单位长度材料去除量的理论模型,理论分析了加工参数对单

位长度材料去除量的影响规律,通过锯切试验利用切片加工质量验证了其影响规律。

## 1 多线线锯运动方式的理论分析

多线往复式线锯切割示意图如图 1 所示。锯丝通过经刻有一定槽距的左、右导向轮形成线网,并在供线主动轮和收线主动轮的带动下进行往复运动,这是线锯切割加工的主运动。工件与线网间以一定的进给速度  $v_f$  进行相对运动,并保证材料的持续去除。对于以上两种运动的具体分析如下。

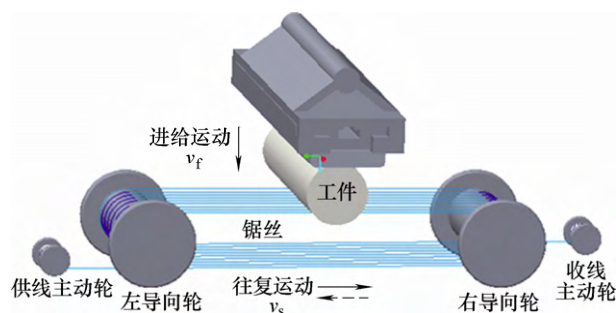


图 1 多线往复式线锯运动示意图

### 1.1 线锯往复运动及单片用线量

锯丝先缠绕贮放于供线主动轮和收线主动轮上,供、收线主动轮在各自电机的驱动下完成旋转运动,如图 1 所示。设锯丝从供线主动轮向收线主动轮运动方向为正,反之从收线主动轮向供线主动轮运动方向为负,锯丝的一个完整的往复运动包括正向加速运动、匀速运动、减速运动以及反向加速运动、匀速运动、减速运动六个过程,如图 2 所示。假设线锯运动过程中正向加速、减速以及反向加速、减速的加速度都相同。可用式(1)来描述往复运动周期中线速度的变化规律

$$v_s(t) = \begin{cases} a_w \cdot \text{mod}(t, T_0) & 0 \leq \text{mod}(t, T_0) < t_a \\ v_w & t_a \leq \text{mod}(t, T_0) < t_a + t_f \\ v_w - a_w \cdot [\text{mod}(t, T_0) - (t_a + t_f)] & t_a + t_f \leq \text{mod}(t, T_0) < t_a + t_f + t_d \\ -a_w \cdot [\text{mod}(t, T_0) - (t_a + t_f + t_d)] & t_a + t_f + t_d \leq \text{mod}(t, T_0) < 2t_a + t_f + t_d \\ -v_w & 2t_a + t_f + t_d \leq \text{mod}(t, T_0) < 2t_a + t_f + t_d + t_r \\ -v_w + a_w \cdot [\text{mod}(t, T_0) - (t_a + t_f + t_d + t_r)] & 2t_a + t_f + t_d + t_r \leq \text{mod}(t, T_0) < T_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $a_w$  为线的加速度;  $t_a$  为加速时间;  $t_d$  为减速时间,并假设线换向时的加、减速时间相等,即  $t_a = t_d$ ;  $t_f$  为线锯正向匀速运动时间;  $t_r$  为线锯反向匀速运动时间;  $\text{mod}$  为取余函数;  $t$  为线锯切割时任意时间;  $T_0$  为一个往复周期总运动时间,其值等于  $4t_a + t_f + t_r$ ;  $v_w$  为最高线速度,也是平稳期的线速度,往复运动时最高线速度值相等但方向相反。在锯切过程中,

为保证有新锯丝不断地投入切割,线锯的正向匀速时间  $t_f$  设置得比反向匀速时间  $t_r$  要大。单片用线量定义为锯切完一片切片所需要消耗的新锯丝长度,单位为米/片(m/pcs)。由式(1)可知,一个往复运动周期内锯丝的用线量为  $v_w(t_f - t_r)$ ,设一次总的切片数量为  $n$  及完成切片的总时间为  $T$ ,则平均单片用线量  $w_u$  可以用式(2)表达出来。

$$w_u = \frac{T v_w (t_f - t_r)}{(4t_a + t_f + t_r)n} \quad (2)$$

式(2)中,通过调整正向匀速时间  $t_f$  和反向匀速时间  $t_r$  的差值,可以获得不同的单片用量值。

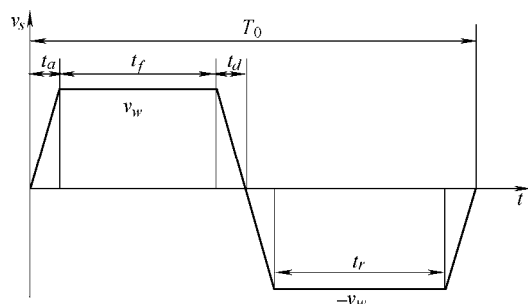


图2 锯丝往复运动线速度图

## 1.2 工件进给运动及进给速比

对于一般加工而言,进给运动多保持稳定的速度。但是对于线锯切割,当切割工件为圆柱形时,其截面是圆形。以稳定速度进给时,则线锯与工件的接触弧长会随着工件形状而产生变化,从而导致加工过程不稳定,因此,在实际加工中,会根据切割深度的变化而调整不同时间段的进给运动。

在线锯切割过程中,锯丝受力作用将会产生弯曲,TEOMETE 等<sup>[7]</sup>在试验中发现 25 mm 切割长度的锯丝上产生的最大弯曲不超过 0.4 mm,而实际生产中锯丝单位长度的弯曲度不超过 0.02。因此在以下研究中线的弯曲被忽略不计,假设线与工件的接触是直线。在锯切加工过程中任意切割位置工件与锯丝间的接触长度可以用式(3)表示。

$$l_c(y) = 2\sqrt{r^2 - (r-y)^2} \quad 0 \leq y \leq 2r \quad (3)$$

式中,  $l_c$  是指工件与锯丝的理论接触长度;  $r$  是晶棒的半径,  $y$  是线在不同的切割位置,如图3所示。

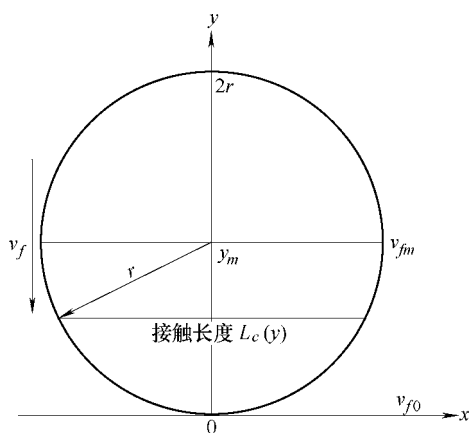


图3 工件进给速度示意图

在切割过程中,由于工件切面为圆形,接触长度会随切割位置  $y$  而发生变化,为确保在整个切割过程材料去除率都保持稳定,不同切割位置处的进

给速度也应随之进行变化。文献[10]中给出式(4)来确定不同位置处的进给速度。

$$v_f(y) = \frac{k}{2\sqrt{r^2 - (r-y)^2}} \quad (4)$$

式(4)中  $k$  为常数,但是对于式(4),当  $y=0$  或  $y=2r$  时,分母为零,要求进给速度是无限大,这在实际生产时难以实现。

因此为保证分母不为零,本文借鉴文献[11]的研究结果,假设进给速度的取值表达为

$$v_f(y) = \frac{k}{2[r^2 - (r-y)^2] + c} \quad (5)$$

式(5)中  $c$  为不为零常数。由上式可知,当  $y=0$ , 或者  $y=2r$  时,此时的  $v_f$  的值最大,而当  $y=r$  时,  $v_f$  值最小。即工件在开始切割和最后切割阶段进给速度值最大,而锯丝切到工件中间位置时进给速度值最小,假设刚开始切割时的速度为  $v_{f0}$ , 中间位置时的速度为  $v_{fm}$ , 如图3所示,把中间进给速度与开始进给速度的比值定义为进给速比  $u$ , 用式(6)表示

$$u = \frac{v_{fm}}{v_{f0}} \quad (6)$$

对于式(5)中,当  $y=0$  时,  $v_{f0}=k/c$ ; 当  $y=r$  时,  $v_{fm}=k/(2r^2+c)$ ; 结合式(6)可求出  $c$  值为

$$c = \frac{2r^2 u}{1-u} \quad (7)$$

对于整个晶棒  $2r$  长度而言,设其晶棒总切割时间为  $T$ , 则可得

$$\int_0^{2r} \frac{1}{v_f(y)} dy = T \quad (8)$$

将式(5)代入到式(8)可得

$$\int_0^{2r} \frac{2[r^2 - (r-y)^2] + c}{k} dy = T \quad (9)$$

可求出  $k$  值为

$$k = \frac{4r^3(2+u)}{3T(1-u)} \quad (10)$$

把式(7)、(10)中的  $c$  值和  $k$  值代入式(5)可以得到进给速度的取值表达为

$$v_f(y) = \frac{2r^3(2+u)}{3T[r^2 - (r-y)^2](1-u)} \quad (11)$$

在实际生产中,通过确定  $T$  来确定晶棒的总体加工时间,并通过式(11)调整进给速比  $u$  来设定相同加工时间下,不同位置处的进给速度值。

假设工件半径  $r$  等于 50 mm, 总切割时间  $T$  等于 7 h, 图4显示了不同进给速比条件下,进给速度随切割位置的变化。

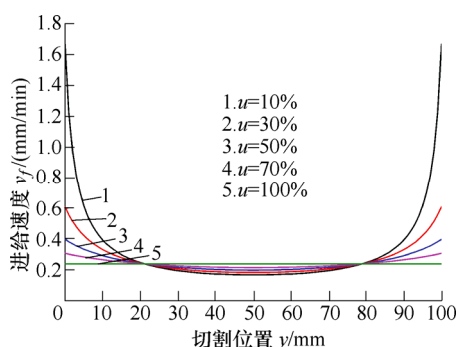


图 4 不同进给速比时的进给速度曲线

从图 4 中可以看出,当进给速比为 100%时,此时加工时的进给速度值保持不变,为匀速加工,随着进给速比的减小,不同切割位置处的进给速度值也随之发生变化。从图 4 中可以看出,当进给速度比小于 1 时,进给速度在刚开始阶段值最大,随着切割的进行其值逐渐下降,然后进入相对稳定的较小值阶段直到锯丝锯切到工件中间位置时速度值最小,在加工工件后半段,进给速度对称于前半段布置直到最后锯切阶段其值又达到开始锯丝时的最大进给速度值。相对而言, $u$  值越小,刚开始与结束阶段两边进给速度值就越大,切割过程速度变化也越大; $u$  值越大,两边进给速度值就越小,切割过程进给速度变化越小。

## 2 单位长度材料去除量的理论分析

### 2.1 单位长度材料去除量的定义

在加工过程中,材料去除率是指单位时间所去除材料的总量,对于线锯加工,在任意切割位置的材料去除率可表述为

$$Q = v_f(y) l_c(y) d$$

式中, $d$  为实际锯缝宽度,可假定为锯丝的直径。

再考虑到去除材料过程中所使用的线的情况,可定义单位长度材料去除量  $R(y)$ ,表示在切割过程中单位长度锯丝所去除的工件材料的总体积,用式(12)表示

$$R(y) = \frac{v_f(y) l_c(y) d}{v_s(y)} \quad (12)$$

式中  $v_s(y)$  为  $y$  位置处的线速度。

结合实际生产所设置的参数,确定理论计算单位长度材料去除量的基本参数如下:线的往复运动如图 2 所示,其中  $t_a=t_d=2.5$  s,  $t_f=20$  s,  $t_r=19.5$  s;切片数量  $n=200$ ;完成切片的总时间  $T=7$  h;所加工晶圆的半径  $r=50$  mm;所用线锯直径  $d=0.18$  mm。

### 2.2 进给速比对单位长度材料去除量的影响

在线锯的往复运动中,线的加减速时间相对于

最高线速度  $v_w$  运行时间小很多,因此可忽略线加减速的变化,假定锯丝的平均速度  $\bar{v}_s$ ,等于其最高线速度  $v_w$ 。令  $v_s(y)$  等于  $\bar{v}_s$ ,利用 Mathcad 软件将式(3)及式(11)代入到式(12)进行计算。可得不同进给速比下的单位长度材料去除量曲线,如图 5 所示。其中单片用量线  $w_u=16.7$  m/pcs。

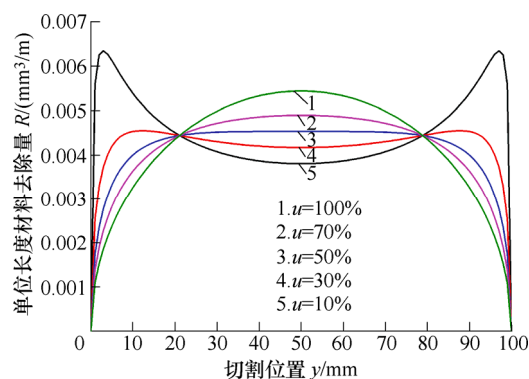


图 5 不同进给速比下的单位长度材料去除量曲线

从图 5 可以看出,当  $u=100\%$  时,即在整個锯切阶段进给速度保持不变,为匀速运动时,单位长度材料去除量随锯丝与工件的接触长度的变化而变化,即随着切割位置的增长而先增加再逐渐减小,其变化趋势和线与工件的接触弧长的变化趋势一样。随着  $u$  值的减小,不同切割位置处的单位长度材料去除量也随之发生变化,其中间切割位置处的单位长度材料去除量逐渐减小,而两边位置处的单位长度材料去除量逐渐增加,整个切割过程中单位长度材料去除量逐渐趋于平稳。但当  $u$  值太小时(10%),两边切割位置处的单位长度材料去除量则出现显著的增加,整个加工过程又重新变得不平稳。而加工过程中单位长度材料去除量保持平稳,就意味着加工过程相对稳定,这对加工质量是有好处的。因此,从图 5 可以看出,为了获得平稳的加工过程,进给速比不能取得太大,但也不可太小。

取切割中点位置  $y=50$  mm 处的单位长度材料去除量为纵坐标,进给速比为横坐标,可得不同进给速比对单位长度材料去除量的影响如图 6 所示。从

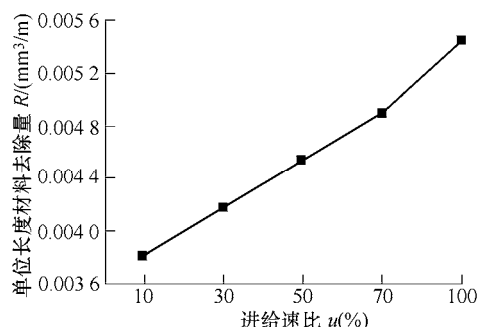


图 6 不同进给速比对单位长度材料去除量的影响规律



图6可以看出,随着进给速比的增加,单位长度材料去除量大致呈线性增加趋势。

### 2.3 单片用线量对单位长度材料去除量的影响

根据式(2),可求得不同单片用线量  $w_u$  条件下,锯丝的平均速度如式(13)所示

$$v_s = \frac{(4t_a + t_f + t_r)n}{T(t_f - t_r)} w_u \quad (13)$$

将式(3)、(11)及式(13)代入到式(12),可得到在进给速比  $u$  为30%时不同单片用线量条件下整个锯切过程的单位长度材料去除量曲线,如图7所示。

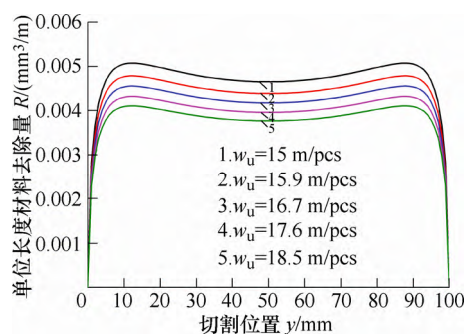


图7 不同单片用线量下的单位长度材料去除量曲线

从图7中可以看出,当进给速比确定时,不同的单片用线量的情况下,得到的单位长度材料去除量曲线趋势相同,即刚开始切削阶段,其值从零迅速在较短时间内增加到某一最大值,然后缓慢减小到趋于平稳的中间切割阶段,后半段锯切曲线对称于前半段,单位长度材料去除量在缓慢增加到某一最大值,最后锯切阶段其值在较短时间内迅速减小到零从而完成切割任务。从图7中还可以看出,随着单片用线量的增加,其单位长度材料去除量随之减小。

取切割中点位置  $y=50$  mm时的单位长度材料去除量为纵坐标,单片用线量为横坐标,可得不同单片用线量对单位长度材料去除量的影响如图8所示。从图8可以看出,随着单片用线量的增加,单位长度材料去除量呈线性减小趋势。

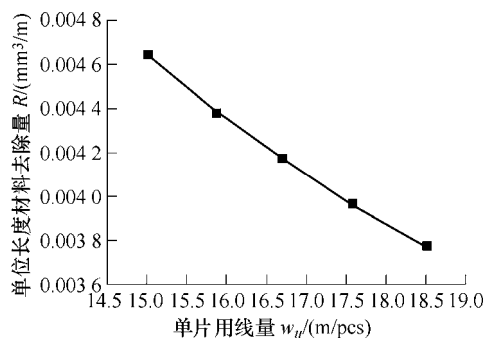


图8 不同单片用线量对单位长度材料去除量的影响

## 3 锯切试验验证

孟剑峰<sup>[12]</sup>认为线锯切割加工过程中,材料的去除与单颗磨粒的切削厚度有关,磨粒的切削厚度会影响加工表面质量。而本文所定义的单位长度材料去除量与单颗磨粒切削厚度之间有着明显的对应关系。因此本文改变单片用线量及进给速比,从而获得不同的单位长度材料去除量,通过跟踪加工晶片质量的变化,以此来对上述理论模型进行验证。

### 3.1 试验装置及方案

试验是在瑞士MB公司的DW288型多线往复式金刚石线切割机上进行,试验装置如图9所示。左、右导向轮槽距1.03 mm,切割所使用的锯丝为线径0.18 mm、磨粒大小30~40  $\mu$ m的电镀金刚石线。工件为直径为100 mm的C向蓝宝石晶棒,长206 mm,装夹于可实现摇摆运动的夹具上,最大摇摆角度8°,工件从上向下进给完成切割试验。试验中锯丝的张紧力40 N。试验过程中,锯丝做往复运动,其正向及反向加速、减速运动时间均为2.5 s,正向匀速运动时间为20 s,反向匀速运动时间为19.5 s。最大线速度为22 m/s,试验参数如表1所示。

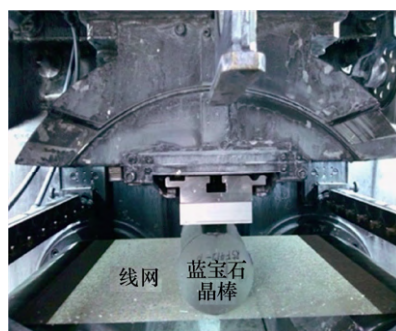


图9 多线线锯试验装置

表1 试验参数

加工参数	值	
	1	2
进给速比 $u(\%)$	30	50
单片耗线量 $w_u/(m/pcs)$	16.7	15.9

一次加工中,总切片数为200片,从供线主动轮端开始,每间隔20片取一片晶片,共计10片进行测量。分别记录其所在的位置。晶片质量用Tropel平坦度测量仪进行测量,主要测量指标为晶片质量检测中最常用的两项指标:翘曲度Warp和弯曲度Bow。翘曲度指切片在不受外力影响下中间面最高点与最低点的距离;弯曲度指切片在不受外力影响下下凹(-Bow)或上凸(+Bow)的程度,两个指标的示意图如图10所示。

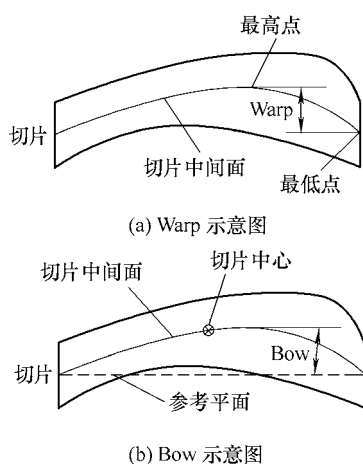


图 10 切片表面质量评价指标的示意图

### 3.2 试验结果及分析

图 11 是在进给速比分别为  $u=30\%$  和  $u=50\%$  条件下，测得 10 片切片的翘曲度和弯曲度的结果。

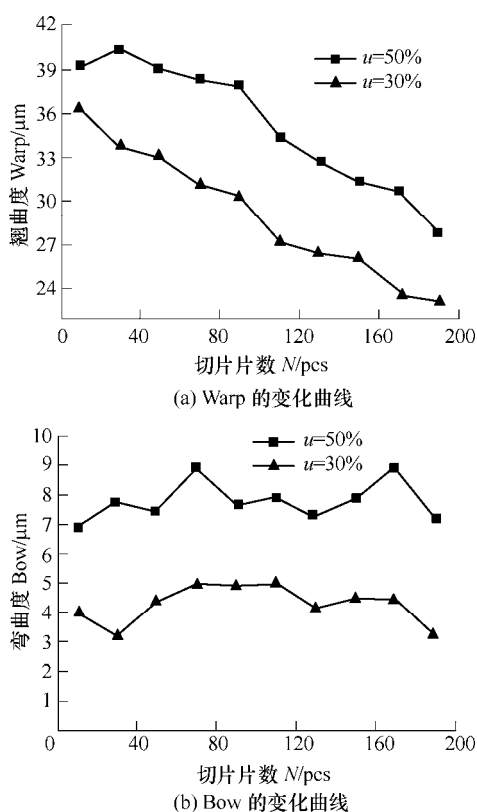
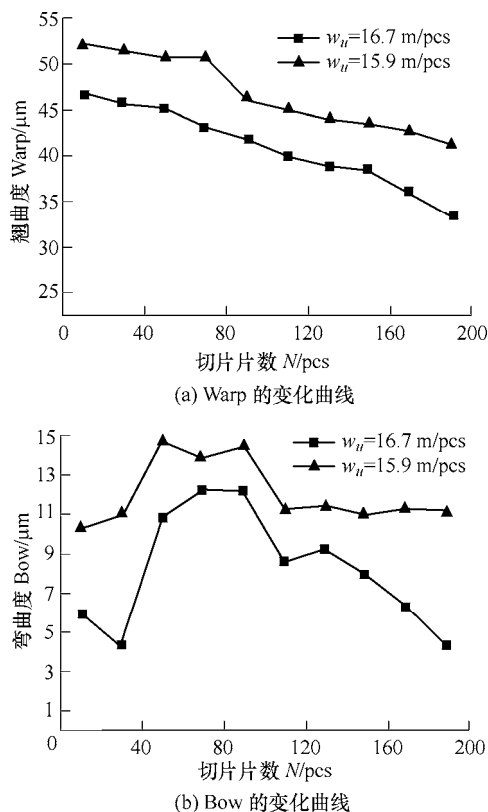


图 11 不同进给速比下的加工质量  
(单片用线量  $w_u=16.7$  m/pcs)

从图 11a 中可以看出，从供线端到收线端，随切片片数的增加，翘曲度呈明显下降趋势，进给速比为 30% 时比进给速比为 50% 时能获得更小的翘曲度。从图 11b 中可以在同一进给速比情况下，不同位置切片的弯曲度变化不明显，维持在  $2\mu\text{m}$  的变化范围内，切片在 30% 的进给速比时比进给速比为 50% 能得到更小的弯曲度。相比而言，进给速比为 30% 比进给速比为 50% 时获得的切片质量更好。

图 12 是单片用线量分别为 16.7 m/pcs 和 15.9 m/pcs 的情况下，测得 10 片切片的翘曲度和弯曲度结果。

图 12 不同单片用线量下的加工质量(进给速比  $u=30\%$ )

从图 12a 中可以看出从供线端到收线端晶片翘曲度随切片片数的增加呈下降趋势，单片 16.7 m 的用线量比单片 15.9 m 的用线量获得的晶片翘曲度更小。从图 12b 中可以看出弯曲度在切片中、前位置的值较大而两端相对小，相对而言单片 16.7 米用线量比单片 15.9 m 单片用线量能获得更小的弯曲度。相比而言，单片 16.7 m 用线量比单片 15.9 m 单片用线量能获得更好的切片加工质量。

结合图 5~8 可以看出，选用合适的进给速比时，可以在加工过程中获得较为稳定单位长度材料去除量，相比于大进给速比和小进给速比，其单位长度材料去除量更加稳定，其值也相对较低；当选用大的单片用线量时，其单位长度材料去除量会显著减小。随着单位长度材料去除量的减小，则单位线锯的载荷也相应的减小，锯丝磨损随之减小，加工过程更加稳定，加工质量也相应提高。这点从后续的锯切试验中可以得到较好的验证(见图 11，图 12 所示)。

上述的理论和试验均证实，单位长度材料去除量作为一个综合指标，可以较好地反映多线往复式线锯的加工过程及加工质量，通过对单位长度材料

去除量的分析,可以更好地理解线锯加工过程,并对其进行合理的调控。本文的研究结果对多线线锯切割中设计与选择加工参数具有指导意义和参考价值。

## 4 结 论

(1) 建立了单位长度材料去除量的理论模型,通过理论模型可知,随着进给速比的减小,锯切过程中单位长度材料去除量逐渐趋于平稳,但当进给速比太小时,单位长度材料去除量又重新变得不稳定。

(2) 理论可知,随着单片用线量的增加,锯切过程中单位长度材料去除量的形状不会发生变化,但是其幅值会整体减小。

(3) 锯切试验表明,随着单位长度材料去除量的减小,所锯切加工的晶片质量可显著提高。

## 参 考 文 献

- [1] HSU C Y, CHEN C S, TSAO C C. Free abrasive wire saw machining of ceramics[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40: 503-511.
- [2] GUIMARAES L, SANTOS R, LOBO B A. Scheduling wafer slicing by multi-wire saw manufacturing in photovoltaic industry: A case study[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53: 1129-1139.
- [3] CHEN K, LIU Y, WANG X, et al. Novel texturing process for diamond-wire-sawn single-crystalline silicon solar cell[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 133: 148-155.
- [4] CHUNG C H, TSAY G D, TSAI M H. Distribution of diamond grains in fixed abrasive wire sawing process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73: 1485-1494.
- [5] 张义兵, 戴瑜兴, 袁巨龙, 等. 多线切割机床张力控制系统设计实现[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 295-300. ZHANG Yibing, DAI Yuxing, YUAN Julong, et al. Design and implement of wire tension control system for multi-wire saw[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 295-300.
- [6] LIEDKE T, KUNA M. A macroscopic mechanical model of the wire sawing process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(9): 711-720.
- [7] TEOMETE E. Investigation of long waviness induced by the wire saw process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(7): 1153-1162.
- [8] 王建臣, 邓小雷, 王涛. 硅片多线切割的温度场仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(9): 32-38. WANG Jianchen, DENG Xiaolei, WANG Tao. Research on temperature distribution in silicon wafers slicing with wire saw[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(9): 32-38.
- [9] 刘永, 李淑娟, 李言, 等. 基于中心复合设计试验的 SiC 单晶片超声振动加工工艺参数优化[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 193-198. LIU Yong, LI Shujuan, LI Yan, et al. Central composite design test based process parameters optimiaing for compound machining with ultrasonic vibration on SiC wafer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 193-198.
- [10] KIM H, KIM D, KIM C, et al. Multi-wire sawing of sapphire crystals with reciprocating motion of electroplated diamond wires[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013, 62(1): 335-338.
- [11] 郑生龙. 多线摇摆往复式线锯切割蓝宝石表面质量的试验研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2016. ZHENG Shenglong. Experimental research on sapphire surface quality sliced by multi-wire rocking sawing with reciprocating motion of diamond wires [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2016.
- [12] 孟剑峰. 环形电镀金刚石线锯加工技术与加工质量研究[D]. 济南: 山东大学, 2006. MENG Jianfeng. Research on machined technology and machined quality of endless electroplated diamond wire saw[D]. Jinan: Shandong University, 2006.

作者简介: 林志树, 男, 1973 年生, 博士研究生, 副教授。主要研究方向为超精密加工工艺与装备。

E-mail: linzs@xmut.edu.cn

黄辉(通信作者), 男, 1974 年生, 博士, 教授, 博士研究生导师。

E-mail: huangh@hqu.edu.cn