

文章编号: 1007-2861(2009)05-0506-06

多丝切割的“滚-刻-削”混合加工机理

程志华, 杨敏, 裴仁清

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 当前多丝切割的环境并非理想, 加工要求并非相同. 而理想及单一的“滚-刻”切割加工模型对整个过程难以解释周全. 基于多丝切割中磨粒运行存在多种状态, 指出研磨粒的综合力学行为(研磨粒的加工机理)取决于研磨液膜的流体力学条件, 处于半接触和全接触状态下的磨粒, 各自以“滚-刻”、“滚-刻-削”方式实施切割加工. 故多模型混合加工可以较好地解释多丝切割加工的整个过程, 多模型的混合加工模式更加接近实际状况.

关键词: 磨粒; 多丝切割; 滚-刻; 滚-刻-削

中图分类号: TG 508.1

文献标志码: A

Hybrid Machining Mechanism of Roll-Indent-Chipping in Multi-wire Sawing Process

CHENG Zhi-hua, YANG Min, PEI Ren-qing

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The ideal and single roll-indent sawing machining model cannot explain the whole multi-wire sawing process because the environment of the process is not ideal and the requirement of process is not always the same. Based on multiple states existing in the movement of grind granule in multi-wire sawing process, this paper introduces integrated mechanical behavior of the granule-machining mechanism of grind granule determined by the hydrodynamics condition of the slurry fluid film. The granule in the status of semi-contact and full-contact uses roll-indent and roll-indent-chipping processes independently to implement sawing machining. That is the reason why multiple hybrid machining mechanics can explain the whole multi-wire sawing process. This mode is closer to the reality.

Key words: granule; multi-wire sawing; roll-indent; roll-indent-chipping

多丝切割是一种不影响工件特性的非化学的物理加工方法, 可以切割放电式切割(electrical discharge machining)所不能切割的非导电物质(non-electrically conductive materials). 通过金属丝的高速(往复)运动, 把磨料带入工件加工区域

进行研磨, 最终把工件切割成薄片. 在整个切割过程中, 主要涉及高速运动的金属丝、研磨液、研磨粒和被加工件, 磨粒在此起着刀具的作用.

自20世纪90年代以来, 国内外众多学者对此进行了大量的研究工作. Möller等基于划刻过程对

收稿日期: 2008-05-12

通信作者: 程志华(1962~), 男, 副教授, 博士生, 研究方向为机械制造及自动化. E-mail: chengzh@shu.edu.cn

多刀切割建立了近似模型^[1],由于固定和游离磨粒的差异,其结果不适合于游离磨粒多丝切割技术。Buijs 等基于滚动磨粒和崩裂切除的假设,建立了玻璃研磨的数学模型^[23],但由于研磨和切割加工的差异,其研究结果是否能直接应用于多丝切割加工仍有许多疑问。

近年来,针对多丝切割加工(见图1)的研究^[4-6]有了迅猛的发展,已有研究大多以单磨粒的“滚-刻”机理和硬脆材料的崩裂切除为推论,Möller 和 Kao 团队在机理推导和实验验证上做了大量的研究工作^[1,79]。但实际运行的游离磨粒的切割过程相当复杂,与加工工艺密切相关。通过切割试验分析观察发现,由于加工目的、要求或工艺条件的限制,实际的切割表面具有各种不同的切割效果(见图2)。这些现象与磨粒的运行状态(切割机理)密切相关,与切割工艺参数的控制密切相关。可以认为,正是由于实际运行时多丝切割加工不可能完全处在理想环境或理想条件之下,故理想的“滚-刻”加工模型与实际切割效果存在一定的距离。我们认为,在实际切割中,磨粒不仅实施了“滚-刻”切割,在部分切割区段还参与了“磨-削”切割。实际运行的多丝切割加工以单一的“滚-刻”模型较难描述,多模型的“滚-刻”、“滚-刻-削”的混合加工与实际情况更加贴近。

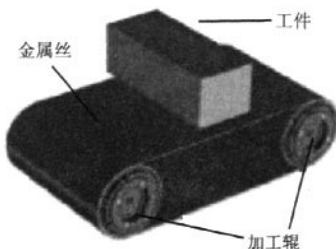


图1 多丝切割加工过程

Fig.1 Schematic of the wiresaw slicing process

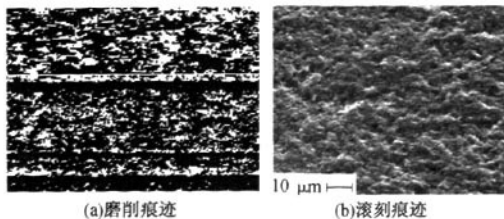


图2 实际材料切割加工后的不同表面现象

Fig.2 Surface optical micrograph of the silicon wafers

1 研磨粒的运动状态

多丝切割研磨加工区域如图3所示。金属丝与硅锭不发生直接接触,金属丝和工件之间的加工区域充满了研磨液。随着金属丝的运动,金属丝正下方和侧面的研磨颗粒起着切割加工作用,而金属丝上方的研磨粒不参与研磨加工。由于充当刀锯的磨粒分布在研磨液中,可以认为研磨粒的综合力学行为在相当程度上取决于硅锭和金属丝之间研磨液的流体力学行为。

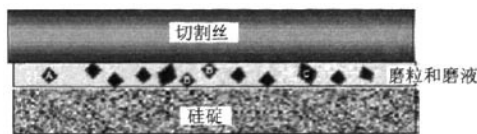


图3 多丝切割研磨加工区域

Fig.3 Schematic of the cutting zone

由于金属丝的韧性、切割加工中研磨液的温度控制以及研磨液所受的正压力(荷载)较小,为简化分析,基于摩擦学理论,我们认定加工区域金属丝的弹性变形不可忽略,研磨液粘度的变化可以忽略。那么,切割丝与研磨液的接触区域属于线接触弹性-等粘度区(IE)。根据弹性流体动压理论,假定研磨液温度恒定不变,弹性效应大于粘性效应时,膜厚参数 \bar{H} 可采用 K. Herred Rugh 公式计算获得:

$$\bar{H} = 3.01 \bar{V}^{0.6} \bar{F}_{\text{tot}}^{-0.2}, \quad (1)$$

式中,速度参数为

$$\bar{V} = \frac{\mu v}{RE}, \quad (2)$$

荷载参数为

$$\bar{F}_{\text{tot}} = \frac{F_{\text{tot}}}{RE}. \quad (3)$$

假设金属丝和硅锭表面充分光滑(弹流动压为主),简化式(1),可建立最小膜厚计算公式如下:

$$H_{\min} = R \bar{H} = \frac{k R^{0.6} v^{0.6} \mu^{0.6}}{F_{\text{tot}}^{0.2} E^{0.4}}, \quad (4)$$

式中, v 为走丝速度, μ 为研磨液粘度, F_{tot} 为研磨液对金属丝的总举力(或金属丝对研磨液的正压力), E 为金属丝和硅锭的综合弹性模量, R 为金属丝和硅锭的形状参数, k 为经验系数。

从上述公式可以看出,在切割加工区域,研究关注的研磨液膜的最小厚度主要与研磨液粘度、走丝速度成正比例关系,与正压力成反比。

忽略研磨液粘度的变化,研究切割加工区域的最小膜厚,利用非压缩流体的 Reynold 方程仿真分析可得:区域内研磨液的膜厚并不相等,加工区域的入口研磨液膜厚最大,加工区域内研磨液膜厚不断减小(见图4)。由于切割环境多变量的复合作用,膜厚的变化不为线性。

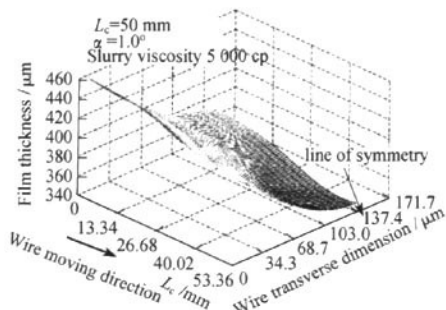


图4 加工区域膜厚仿真

Fig.4 Profile of film thickness

由于加工区域内金属丝和硅锭之间研磨液膜厚度的不同,可将研磨粒(金属丝的低面、侧面)的运行状态分为以下三类。

(1) 非接触状态

非接触状态一般发生在研磨液膜厚较大的(切割入口等)区域,研磨液中的磨粒直径通常小于膜厚且自由悬浮(图3中A处)。磨粒既不与金属丝也不与硅锭直接接触,不参与切割加工。由于磨液流体速度梯度的存在,在正压力(金属丝施加于研磨液上)和流体运动形成的剪切力作用下,非接触状态下的研磨粒呈向前、向下运动及翻滚运动(见图5),直至与硅锭接触转入半接触状态。

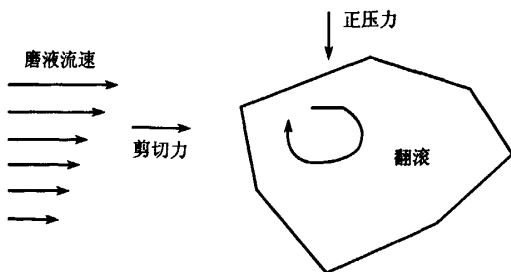


图5 非接触状态下磨粒状态

Fig.5 Grain under the non-contact regime

假设研磨液为牛顿流体,那么剪应力的计算公式为

$$\tau = \mu \frac{dv}{dh} \approx \mu \frac{v}{h}, \quad (5)$$

式中, μ 为研磨液粘度, v 为切割丝走丝速度, h 为研磨液膜厚度。

(2) 半接触状态

半接触状态下研磨液的膜厚大于磨粒直径,磨粒与金属丝或硅锭接触(图3中B处),但不同时接触。由于研磨液的运动由金属丝驱动,磨粒的受力主要为垂直加工表面的正向压力和平行加工表面的剪切力。

显然,半接触状态下与金属丝接触的磨粒是不参与对硅锭的切割加工的,二者的接触仅对金属丝造成微小的摩擦损耗。但这些磨粒在金属丝的带动下高速运动,会对其他磨粒产生冲击碰撞,传递能量,加速其他磨粒的翻滚运动。

半接触状态下与硅锭接触的每个磨粒都参与了切割加工。参与切割加工的磨粒在垂直加工表面的正向压力和平行加工表面的剪切力作用下,主要以“滚-刻”模式实施研磨加工^[1]。实际切割的表面形状(见图2)佐证了“滚-刻”加工的存在。

(3) 全接触状态

全接触状态一般发生在研磨液膜厚较小处。由于磨粒既与金属丝又和硅锭表面直接接触(图3中C处),磨粒所受的正压力和剪切力均来自运动的金属丝,故磨粒对硅锭表面和金属丝同时实施研磨加工,切割过程中金属丝发生损耗的主要原因正在于此。

针对切割表面,由于金属丝的韧性和硅锭的脆性特性,全接触状态下的磨粒被高速运行的金属丝拖动。正压力的作用使加工表面产生塑性变形(“滚-刻”的加载),剪切力的作用随后对加工表面实施“磨-削”切割。随着切割的深入,剪切力不断增加,当达到临界阈值时,磨粒或接触表面将发生崩裂(崩裂的磨粒将转入半接触、非接触状态),磨粒与金属丝及切割表面的接触点将发生脱落(“滚-刻”的卸载)。由于磨液的作用,磨粒将以其中心点发生前行滚翻,进而实施下一个切割过程。我们认为,磨粒在全接触状态下,以“滚-刻-削”的混合研磨方式不断重复,实现高效切割。

2 “滚-刻”模型

游离磨粒线锯在理想加工条件下,研磨粒和硅锭之间没有相对滑动。在金属丝的带动及研磨液流

体动压力的作用下,磨粒在加工区域中滚动前行.同时,由于磨粒较锋利的棱角,能够对加工硅碗的局部表面形成较高的压力,对硅碗表面进行“缺刻”加工(见图6).这种基于压痕断裂理论的“滚-刻”模型就是多丝切割过程中研磨加工的力学基础.

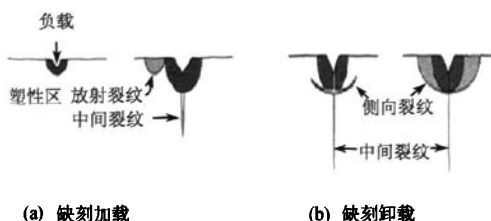


图6 单一磨粒的缺刻加工

Fig.6 Schematic diagram of the crack system below a sharp indenter upon loading and unloading

“滚-刻”模型单一磨粒材料移除量近似计算为

$$V_0 = \pi C^2 d, \quad (6)$$

式中, C 为侧向裂纹长度, $d = a/2 \tan \varphi$ (a 为磨粒平均直径, φ 为磨粒切角).

若单位时间 (Δt) A_s 接触面内有 m 个磨粒实施“缺刻”切割,那么“滚-刻”模型的加工效率为

$$v_s = \frac{mV_0}{A_s \Delta t}. \quad (7)$$

3 “滚-刻-削”混合模型

“滚-刻-削”混合模型切割机理如图7所示.就单磨粒的切割过程可知,在离散化后,“滚-刻-削”的混合研磨加工可分成“滚-刻”和“磨-削”两部分进行单独分析.与磨粒的“滚-刻”切割机理类似,混合模型的基础同样遵循压痕断裂理论,可参照相关文献作类似的力学分析.

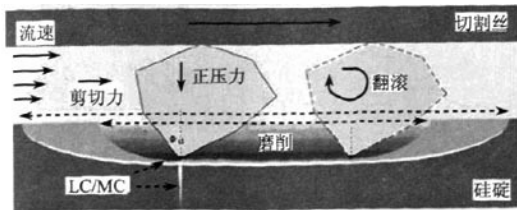


图7 “滚-刻-削”混合切割模型

Fig.7 Roll-indent-chipping model

“滚-刻-削”混合模型切割时,单一磨粒材料移除量近似为

$$V_0 = (\pi C^2 + v \Delta t \cdot 2C) d, \quad (8)$$

式中, v 为磨粒运行速度, Δt 为单位加工时间.

同前定义,混合模型的切割加工效率为

$$v_s = \frac{mV_0}{A_s \Delta t} = \frac{m}{A_s} \left(\frac{\pi C^2}{\Delta t} + v \cdot 2C \right) d. \quad (9)$$

由式(9)可知,“滚-刻-削”混合模型的加工效率为“滚-刻”和“磨-削”加工效率之和.研磨粒在全接触状态下,以“滚-刻-削”切割为主,切割效率较高.德国 Möller 教授在针对多丝切割加工效率的研究中指出^[1],不同状态下磨粒的切割效率具有明显的边界(见图8).磨粒的切割并非单一的“滚-刻”模式,高效全接触状态的切割正是对本研究观点的支持.

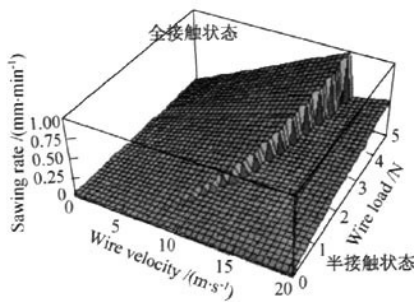


图8 切割效率分布

Fig.8 Sawing rate of the full-contact and semi-contact regime

由于材料的移除受众多因素影响,上述公式的计算相当复杂且不实用.而在多丝切割加工过程中,人们通常关心的可控参数有走丝速度、金属丝施加给磨粒的压力、研磨粒的平均直径和研磨液粘度等(见表1).

基于弹性流体理论,通过切割实验以及工艺数据挖掘,我们得到加工效率的经验公式为

$$v_s = k \mu v F_{\text{tot}} l_m, \quad (10)$$

式中, k, t 为系数, μ 为研磨液粘度, v 为走丝速度, F_{tot} 为切割丝(流体)施加给整个磨粒的正压力 ($F_{\text{tot}} = (d^2 \pi / 4) \times F_t$, F_t 为施加于研磨粒的平均正压力, d 为磨粒的直径),全接触状态下 ($t < 1$) l_m 为研磨粒平均最大直径,半接触状态下 ($t > 1$) l_m 为研磨粒平均直径.

表1 铜陵三科电子公司多丝切割工艺参数
Table 1 Processing parameters of wafers slicing
(Tongling Sanke Electronics Ltd.)

序号	工艺参数			加工效果
	张力/ N	磨粒平均 直径/ μm	走丝速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	MMR/ ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)
1	29	8.0	6	4.54
2	25	11.5	10	4.95
3	29	14.0	15	6.28
4	29	11.5	20	4.57
5	29	14.0	15	6.85
6	25	14.0	10	5.48
7	29	8.0	10	5.21
8	25	11.5	15	5.70
9	20	8.0	15	4.26
10	29	11.5	17	4.62
11	20	11.5	6	3.34
12	20	14.0	10	4.44
13	29	8.0	15	5.70
...

在全接触状态下($t < 1$): ① 由于研磨粒已达平均最大直径,再变化的空间不大,故直径的微小改变对磨粒正压力的影响不大,对切割效率的影响次之; ② 由于受力直接来自切割丝,张力的变化对切割效率的影响巨大; ③ 较高的走丝速度将带入更多的磨粒,将增加流体的动压力,提高切割效率。

在半接触状态下($t > 1$): ① 研磨粒平均直径的变化对磨粒正压力的影响很大,对切割效率的影响巨大; ② 研磨液对磨粒的正压力直接影响着加工效率; ③ 较高的走丝速度将带入更多的磨粒,将增加流体的动压力,提高切割效率。

图9是使用扫描电镜观察实际生产中(日进NWS6X2型多丝切割机切割硅片)使用的研磨粒样本。实施切割后的磨粒图片表明,研磨粒因切割加工产生磨损、崩碎损耗(图9中的微小杂质就是研磨下来的硅屑),切割效果将下降。因此,磨粒的切割并非理想条件下单一的“滚-刻”模式,崩碎损耗的磨粒符合“磨-削”加工存在的推论,符合全接触状态下混合模型的解释。

表2是硅片切割前后的部分数据,图10为使用扫描电镜观察实际生产中使用的切割丝表面。硅片的多丝切割加工使得金属丝表面布满了细小的凹痕和长条的划痕。由研磨粒“滚-刻”造成的凹痕和“磨-削”造成的划痕从另一方面验证了我们对磨粒加工混合模型的假设。

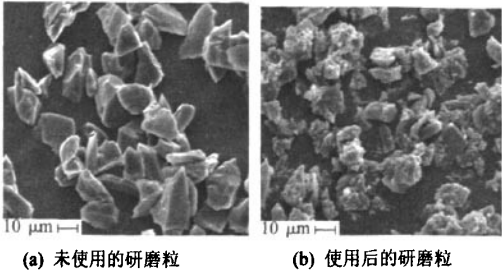


图9 扫描电镜观察的研磨粒
Fig. 9 Optical micrograph of the abrasives

表2 实际切割硅片的损耗数据
Table 2 Wafers slicing data

参数	数据
切割硅片	$\varnothing 150\text{ mm}, 450\text{ mm} \times 2$
刀损	$0.2\text{ mm}, \pi(150)^2 \times 0.2 \times 450 \times 2/4 = 3\,240\,000\text{ mm}^3$
钢丝变化	$\varnothing 0.160, \varnothing 0.145\text{ mm}, 9\text{ m/s}, 6\text{ h}$
丝损	$960\,000\text{ mm}^3$
比值	刀损/丝损 = 3.4

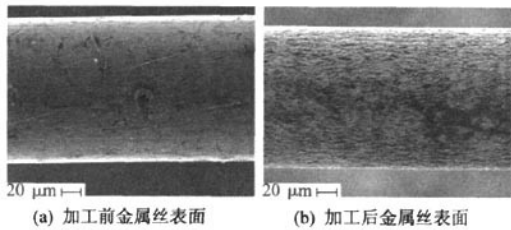


图10 扫描电镜观察的切割丝
Fig. 10 Optical micrograph of the wire

在硅片切割前后,金属丝直径变化不大,但硅片切割的移除量是金属丝损耗的3.4倍。因此,相对柔性的金属丝的损耗远远低于脆性硅材料的移除量,这是多丝切割加工能够实现的一个重要基础。

4 结束语

多丝切割加工磨粒的直径并非均一,且切割的实施是一段区域,因此,磨粒的运行存在多种状态,实施切割的方式也有所不同。理想的、单一的“滚-刻”切割加工模型对整个加工过程难以解释周全,而多模型的混合加工模式更加接近实际状况。

就整个切割加工区域来看,在切割丝的下端,研磨液的膜厚不是均一的,趋势为由大到小。当磨粒直径远小于研磨液膜厚时(如切割入口处),可参与切割的磨粒处于半接触状态,数量虽然较多,但其加工

主要以“滚-刻”为主。切割效率受磨粒直径影响较大,同时也受到运行速度、压力和磨液粘度的影响。当磨粒直径与研磨液膜厚接近时,参与切割的直径较大的磨粒处于全接触状态。此时的切割主要以“滚-刻-削”为主,切割效率较高,与压力、速度(但过高的速度会使膜厚增大,磨粒转入半接触状态,效率下降)成正比。高效的切割发生在此区域。显然,如果此阶段参与加工的磨粒数目过少,在一定程度上会降低切割效率,甚至由于金属丝和硅锭直接接触造成断丝;如果加大金属丝压力将会减小膜厚,相对增加了参与切割的磨粒数量,切割效率将得到有效提高。

另外,在切割丝的两侧,由于金属丝对硅片表面的正压力源于丝的振动以及另一侧磨粒的挤压等因素,相对液膜受力较小。因此,除少数直径较大的磨粒实施“滚-刻-削”加工外,多数磨粒处于半接触和非接触状态,主要以“滚-刻”方式实施研磨加工,这正是游离磨粒线锯切割的产品表面质量较高的原因。

“滚-刻”、“滚-刻-削”的多模型混合加工可以较好地解释多丝切割加工的整个过程。由于研磨粒的综合力学行为(研磨粒的加工机理)取决于研磨液膜的流体力学条件,在整个切割加工区域,处于半接触和全接触状态下的磨粒,各自以“滚-刻”、“滚-刻-削”的方式实施切割加工。参与加工的研磨粒数可以由研磨粒直径的分布(分布曲线可由研磨粒生产厂家提供)得到,通过控制磨粒的运行状态,可得到不同的切割效率和切割质量^[10]。

参考文献:

- [1] MÖLLER H J. Basic mechanisms and models of multi-wire sawing [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(7):501-513.
- [2] BUIJS M, VAN HOUTEN K. Three-body abrasion of brittle materials as studied by lapping [J]. *Wear*, 1993, 166(2):237-245.
- [3] BUIJS M, VAN HOUTEN K. A model for lapping of glass [J]. *Journal of Materials Science*, 1993, 28(11):3014-3020.
- [4] GE P Q. The numerical analysis on action mechanism of slurry in free abrasive wiresaw slicing [J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 359:455-459.
- [5] SANG B. Hydrodynamic action in the free abrasive monocrystalline silicon slicing using a wiresaw [J]. *Lubrication Engineering*, 2006(10):81-83.
- [6] ZHU L Q, KAO I. Computational model for the steady-state elasto-hydrodynamic interaction in wafer slicing process using wiresaw [J]. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2005, 7(5/6):407-429.
- [7] LI J, KAO I, PRASAD V. Modeling stresses of contacts in wiresaw slicing of poly-crystalline and crystalline ingots [J]. *ASME Manufacturing Science and Technology*, 1997, 6(1):430-444.
- [8] LI J, KAO I, PRASAD V. Modeling stresses of contacts in wiresaw slicing of polycrystalline and crystalline ingots [C] // *Proceedings of ASME IMECE '97*. Texas: ASME Press, 1997:439-446.
- [9] ZHU L Q, KAO I. Equilibrium elasto-hydrodynamic analysis in wafer slicing process using wiresaw [C] // *Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, New York. 2001: 123-128.
- [10] 程志华,裴仁清. 晶圆多丝切割加工工艺参数的 BP 建模[J]. *常熟理工学院学报*, 2008, 22(4):93-96.

(编辑:赵宇)