

文章编号: 1006-852X(2007)05-0014-03

利用金刚石线锯切割硅晶体的实验研究^{*}侯志坚^{1,2} 葛培琪¹ 张进生¹ 李绍杰¹ 高玉飞¹

(1. 山东大学机械工程学院, 山东 250061)

(2. 济南大学机械工程学院, 山东 250022)

摘要 本文综述了脆性材料的塑性转变理论、脆性材料塑性加工研究进展情况, 进行了环形金刚石线锯丝切割硅晶体的实验。锯丝单方向连续运动, 因而可以提高切割速度, 锯丝运动速度为 10 m/s 和 21 m/s 两种。工件进给速度分别为 8.4 mm/min、12.6 mm/min 和 20 mm/min 等三种。用扫描电镜检测切割表面并与往复式线锯切割表面进行比较。实验结果及理论分析表明: 锯丝上单个磨粒切削深度极小, 切割表面平整, 无崩碎现象, 表面粗糙度值达 $1.4 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ 接近粗磨加工后的表面。进给速度增大, 表面粗糙度有所增大; 切削速度提高, 表面粗糙度降低不明显, 这与理论分析不一致, 其原因是工艺系统振动、冲击所致。锯丝磨损、磨料脱落是降低切割表面质量的另一原因。

关键词 金刚石锯丝; 切割; 硅晶体; 粗糙度

中图分类号 TG58 文献标识码 A

Experiment research to cut crystal silicon using diamond wire saw

Hou zhijian² Ge Peiqi¹ Zhang Jinsheng¹ Li Shaojie¹ Gao Yufei¹

(1. School of Mechanical Engineering Shandong University Jinan 250061, China)

(2. School of Mechanical Engineering Jinan University Jinan 250022, China)

Abstract In this paper the theory of brittle ductile transforming and the research on brittle material machining are summarized. The experiment on crystal silicon cutting using looped diamond wire saw is finished. The wire moves continually in one direction, so it is allowed that the wire moves at high speed and that cutting speeds are 10 m/s, 21 m/s. The feeding speeds are 8.4 mm/min, 12.6 mm/min and 20 mm/min separately. The cutting surfaces obtained in experiment are examined by SEM and compared with those from oscillatory wire sawing. It is testified by experiment results and analyzes that the cutting depth of single particle is much deeper and that the cutting surface is much smoother and the surface roughness is $1.4 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ that is near to rough ground surface and no fragment. With the increase of feeding speed the roughness increases also. But it is not apparent that the roughness reduces when cutting speed increase, which is different from the theory analysis. The reason may be the vibration of saw system. The pose and wear of diamond particles is another reason to reduced surface quality.

Keywords diamond wire cut crystal silicon roughness

0 前言

硬脆材料具有高强度、高硬度、高脆性、耐磨损和腐蚀、隔热、低密度和膨胀系数及化学稳定性好等特点, 因此获得越来越广泛的应用, 但该类材料往往必须经机械加工才能应用。由于其具有低塑性、易脆性破坏、微裂纹等缺点, 机械加工性能较差, 加工方法选择不当会引起工件表层组织破坏, 无法得到要求的形状

及表面精度。国内外学者对脆性材料塑性转变理论、塑性切削表面形成机理和表面粗糙度及损伤层进行了深入研究。美国学者 T G Bifano^[1]应用金刚石压头对玻璃材料进行压痕实验, 并由此建立了玻璃材料不产生裂纹时的临界切削深度。该研究发现: 脆性材料的去除, 可在微小的材料去除条件下从脆性破坏向塑性变形转变。哈尔滨工业大学陈明君^[2]对单晶硅等脆性材料的超精密磨削加工作了大量实验研究。实验选择

* 国家自然科学基金资助项目 (编号: 50475132), 山东省自然科学基金资助项目 (编号: Y2006F16)

高精度磨床, 磨粒平均尺寸小于 $20 \mu\text{m}$; 采用合适的切削用量, 磨削单晶硅等脆性材料。试验结果表明: 可以在塑性模式下加工出高质量的光滑表面。事实上, 由于加工工艺、设备的进步, 可以允许切削深度小于几个 μm 使得脆性材料加工时, 材料去除机理是塑性流而非脆性破坏成为可能。作为 IC 芯片的单晶硅片, 加工精度要求非常高, 经过切割、研磨、抛光等机械加工后表面粗糙度要求达到纳米和亚纳米级, 表面总厚度变化 (TIV) 要求小于 0.2 。在整个加工工序中, 切割加工占有很重要的地位, 切割表面粗糙度及其它质量指标影响成品率, 切割费用在整个加工成本中占有很大比例。本实验研究目的是研究环形锯丝切割表面质量, 研究加工参数与表面粗糙度的关系, 分析影响切割表面粗糙度的因素, 为降低表面粗糙度, 确定合适的工艺参数。

1 硅晶体线切割实验

1.1 实验设备及金刚石线锯

线锯切割加工中, 锯丝的运动有往复运动和单向连续运动两种方式。本实验中锯丝运动方式为后者。实验在我们自行研制的环形锯丝线锯床上完成。图 1 为实验设备外观图, 锯床有多种速度, 满足不同的要求。硅晶体由夹紧装置安装在工作台上, 伺服电机驱动滚珠丝杠机构, 带动工作台进给运动, 进给速度范围 $0 \sim 1260 \mu\text{mm}/\text{min}$ 。实验使用电镀金刚石锯丝, 金刚石磨粒平均直径 $64 \mu\text{m}$; 锯丝为环形无接头锯丝, 锯丝周长 225mm ; 直径 0.5mm 由 WELL Diamond Wire Saws Inc 制作。

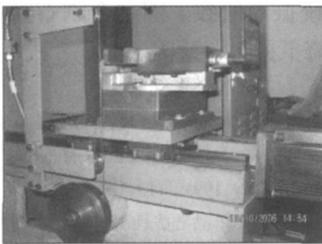


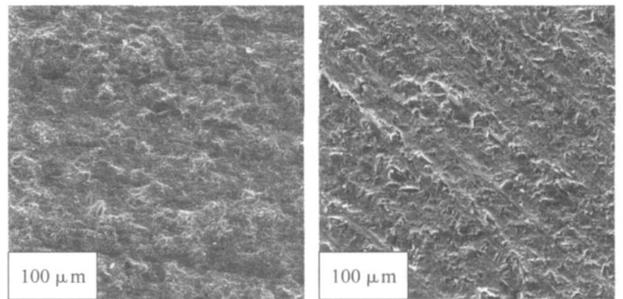
图 1 实验设备

1.2 实验参数

由于使用环形无接头锯丝, 锯丝单方向连续运动, 因此可以大大提高切割速度, 在进给速度较小的情况下, 尽可能减小单个磨粒切削深度, 降低表面粗糙度。本实验中切割工件为直径 $\Phi 40 \text{mm}$ 硅棒, 锯丝运动速度为 $10 \text{m}/\text{s}$ 和 $21 \text{m}/\text{s}$ 两种; 进给速度分别为 $8.4 \text{mm}/\text{min}$ 、 $12.6 \text{mm}/\text{min}$ 和 $20 \text{mm}/\text{min}$ 等三种。用水冷却。

1.3 实验结果

图 2 a 为环形锯丝切割表面放大 300 倍的 SEM 照片, 切割表面平整、无崩碎现象。与往复式直线运动线锯切割相比, 切割表面几何特征不相同, 且面形精度有明显提高。用干涉显微镜检测切割表面, 表面粗糙度值范围 $1.4 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ 。接近粗磨加工后的表面粗糙度。大大减小后续工序的工作量。图 2 b 为使用往复运动线锯切割表面 (锯丝速度 $2 \text{m}/\text{s}$; 进给速度 $0.075 \text{mm}/\text{min}$) 放大 300 倍的 SEM 照片, 可以看出其切割纹理有明显方向性, 沟槽较深, 表面较粗糙。用表面粗糙度测量仪检测切割表面粗糙度, 表面粗糙度范围 $1.4 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ 。接近粗糙度加工后的表面粗糙度。表面粗糙度与切削速度、进给速度之间关系如图 3 所示。



2.a 环形锯丝切割 2.b 往复式线锯切割

图 2 线锯切割表面的 SEM 照片

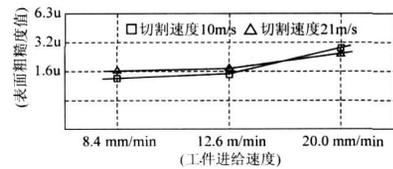


图 3 表面粗糙度与加工参数关系

2 讨论

(1) 由于切割速度提高, 环形锯丝切割, 可以大大减小单个磨粒的切削深度。图 4 为锯切加工相对运动示意图。锯丝沿铅垂方向直线运动, 硅晶体水平方向直线进给。单个磨粒切削深度与切削用量之间关系可近似用下式表示:

$$a_p = \frac{f}{6000 v_n} \tag{1}$$

式中: a_p ——单个磨粒切削深度, 单位 mm ;

f ——工件切割进给速度, 单位 mm/min ;

v ——线锯运动线速度, 单位 m/s ;

n ——锯丝单位长度上的磨粒数, 单位 $1/\text{mm}$

将锯丝低速运动速度 $10 \text{m}/\text{s}$ 和高速运动速度 $21 \text{m}/\text{s}$ 工作台进给速度最大值 $20 \text{mm}/\text{min}$ 和最小值 8.4

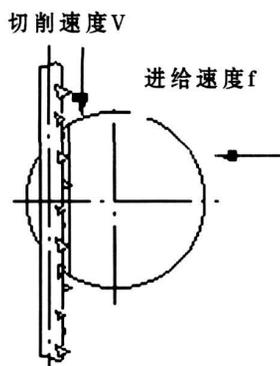


图 4 锯切相对运动

mm/m^2 分别带入 (1) 式计算可得:

$$a_p = \frac{0.3}{n} \times 10^{-4} - \frac{1.4}{n} \times 10^{-4} \text{ mm}$$

实际上锯丝上多个磨粒参加切割 (图 5 a), 单位长度上参加切割的磨粒个数 n 可根据统计结果得出, 折算到单个磨粒切削深度就非常小, 切削深度有可能小于几个 nm , 也就是说可以在塑性模式下切割, 有利于降低表面粗糙度。

锯丝单方向连续运动, 由于运动速度大, 切割时间短, 磨粒相对切割表面运动轨迹各不相同, 实际上也均化原始误差, 表面纹理没有明显规律性。而往复运动线锯切割, 锯丝运动要经过减速、停顿、换向、加速等过程, 其变化规律会复映在切割表面上, 呈现为规律性的加工痕迹^[3]。锯丝越短、换向越频繁, 加工痕迹也越明显。

(2) 在切削速度相同的情况下, 随着工件进给速度的增大, 表面粗糙度值增大, 这与理论分析结果比较一致。主要原因是残余高度增大, 增大粗糙度; 再就是锯丝与工件之间作用力增大, 增大了磨料与加工表面挤压、滑擦等, 锯丝变形也随之增大, 这点从加工表面纹理也可以看出。

(3) 理论上认为: 在同样的进给速度时, 锯丝速度越大, 表面粗糙度越小, 因为锯丝速度增加使得单个磨粒的未变形切屑厚度减小。实验中当切割速度由 10 m/s 变为 21 m/s 时, 随着锯丝速度的提高, 表面粗糙度没有明显降低, 并且随着进给速度增大, 表面粗糙度增大不明显。虽然单颗磨粒的未变形切屑厚度减小, 粗糙度应减小, 其原因是速度增大, 锯丝与工件之间冲击增大, 工艺系统振动加剧, 破坏了锯丝相对工件的正确位置, 且后者的影响大于前者。可以利用运动部件动平衡、消除间隙以及增大锯丝张力等措施, 减小锯丝振幅。

(4) 金刚石粒度及磨损对表面粗糙度也有影响, 使用粒度大的金刚锯或新的金刚石线切割, 单颗磨粒切削厚度增加, 使硅晶体容易断裂、崩碎, 从而使锯切

轻快, 表面质量较好; 由于磨损使作用到每颗磨粒上的负荷增大, 容易使金刚石过早破碎或脱落, 从而提高表面粗糙度。图 5 b 为使用过的锯丝, 可以看出有较多的磨粒破碎和脱落, 也有表面堵塞。这种情况下, 切割表面粗糙度值较大。

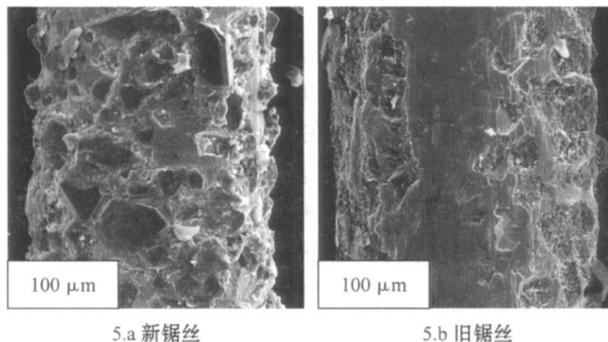


图 5 线锯表面的 SEM 照片

3 结论

进行了硅晶体线切割实验, 切割工具为环形无接头金刚石线锯丝, 锯丝运动速度为 10 m/s 和 21 m/s 两种; 工件进给速度分别为 8.4 mm/m^2 、 12.6 mm/m^2 和 20 mm/m^2 等三种。由于切削速度大, 进给速度小, 可使材料切削深度足够小, 以塑性模式去除。因此可以大大降低切割表面粗糙度, 有利于提高切割质量。检测表明: 切割表面平整, 无崩碎现象, 加工纹理无明显方向性, 表面粗糙度值达 $1.4 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ 。接近粗磨加工后的表面粗糙度。切削参数是影响表面粗糙度的因素。进给速度增大, 表面粗糙度值增大与理论分析一致。切削速度越高, 表面粗糙度降低不明显。这与理论分析有所不同, 主要原因是工艺系统振动所致。固结金刚石磨料的磨损、脱落是表面质量降低的另一原因。

参考文献

- [1] Biřano TG, Dow TA, Scattergood RQ. Ductile—Regime Grinding: A New Technology for Machining Brittle Materials [J]. Journal of Engineering for Industry 1991, 113: 184—189
- [2] 陈明君, 董申, 李旦等. 单晶硅脆性材料塑性域超精密磨削加工的研究 [J]. 航空精密制造技术, 2000 36(2): 8—11
- [3] Craig W, Hardin Jun Qu, and Albert J. Shi. Fixed Abrasive Diamond Wire Saw Slicing Of Single—Crystal Silicon Carbide Wafers [J]. Material and Manufacturing Processes 2004, 19(2): 355—367

作者简介

侯志坚, 男, 1962 年生, 山东滕州人, 济南大学机械工程学院副教授, 现为山东大学机械工程学院博士研究生。研究方向: 硅晶体精密切片技术及应用, 发表论文 20 余篇。

收稿日期: 2007—05—10

(编辑: 王孝琪)