

基于有限元法的 超声辅助线锯单晶硅表面粗糙度影响规律

陈文滨^{1,2}, 陈昌荣^{1,2}, 黄旭^{1,2}, 练国富^{1,2}, 冯美艳^{1,2}

(1. 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为研究超声振动辅助切割单晶硅对硅片的表面粗糙度的影响, 利用 ABAQUS 软件建立单颗磨粒切割单晶硅的二维仿真模型, 通过响应面法(RSM)分析仿真数据, 获得单晶硅表面粗糙度与设定的线切割工艺参数之间的交互关系, 研究单颗磨粒在不同工艺参数下对单晶硅表面粗糙度的影响。研究表明, 通过建立评价表面粗糙度与工艺参数之间的回归模型, 并对模型进行目标优化, 得到最佳的工艺参数为: 超声频率 $f=31$ kHz, 超声振幅 $A=10$ μm , 磨粒速度 $v_l=28$ m/s, 磨粒倾角 $\theta=-15^\circ$, 磨粒半锥角 $\varphi=60^\circ$ 。

关键词: 单晶硅; 超声振动; 有限元仿真; 响应面法; 回归模型; 表面粗糙度

中图分类号: TN305.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)03-0298-09

Influence of process parameters on surface roughness of ultrasonic-assisted wire sawed monocrystalline silicon based on finite element method

CHEN Wenbin^{1,2}, CHEN Changrong^{1,2}, HUANG Xu^{1,2}, LIAN Guofu^{1,2}, FENG Meiyang^{1,2}

(1. Fujian Key Laboratory of Intelligent Processing Technology and Equipment, Fuzhou 350118, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to study the influence of ultrasonic vibration-assisted cutting of monocrystalline silicon on the surface roughness of silicon wafers, a two-dimensional simulation model of single abrasive grain cutting monocrystalline silicon was established by ABAQUS software, and the interaction between the surface roughness of monocrystalline silicon and the set wire-cutting process parameters was obtained by analyzing the simulation data by response surface method (RSM), and the influence of single abrasive grain on the surface roughness of monocrystalline silicon under different process parameters was studied. Results show that by establishing a regression model to evaluate the relationship between surface roughness and process parameters, and optimizing the model, the optimal process parameters are as follows: ultrasonic frequency $f=31$ kHz, ultrasonic amplitude $A=10$ μm , abrasive velocity $v_l=28$ m/s, abrasive inclination angle $\theta=-15^\circ$, abrasive half cone angle $\varphi=60^\circ$.

Keywords: monocrystalline; ultrasonic vibration; finite element simulation; response surface method; regression models; surface roughness

单晶硅是一种典型的正交各向异性的半导体材料, 不同晶向单晶硅有着不同的性质, 最常见的

晶向为 $\langle 100 \rangle$ $\langle 110 \rangle$ $\langle 111 \rangle$ 。其中, 使用最为广泛的 $\langle 100 \rangle$ 晶向硅片^[1]可应用于太阳能电池的制

收稿日期: 2023-12-21

基金项目: 福建省 2022 年中央引导地方科技发展资金项目(2022L3014)

第一作者简介: 陈文滨(1998—), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 研究方向: 先进制造技术。

通信作者: 陈昌荣(1986—), 男, 福建泉州人, 副教授, 博士, 研究方向: 金属增材制造及再制造技术、计算机辅助工程。

造,也是本研究中单晶硅切割的研究对象。单晶硅的莫氏硬度为 9.2^[2],其硬度仅次于金刚石,且脆性很高,被广泛应用于光电子、航空航天、国防工业和生物工程等领域^[3]。

单晶硅的主流加工技术为金刚石线切割技术,超声辅助振动切割可以降低单晶硅表面粗糙度、亚表面损伤、切削力和切割温度等^[4]。然而,超声辅助振动切割受实验和检测条件的限制,且实验成本较高。因此,有限元仿真分析成了研究单晶硅表面性质和切削特性的重要方法之一。

针对单晶硅仿真过程中各工艺参数对锯切力、锯切温度以及亚表面损伤深度的影响,学者开展了大量研究。如张辽远等^[5]通过有限元分析,得到了各工艺参数对单晶硅受到的法向切削力和切向切削力的影响规律;Yan Wang 等^[6]利用 ANSYS 有限元软件分析各工艺参数对金刚石线切割单晶硅的锯切温度的影响规律;郭明壮等^[7]利用仿真分析了不同工艺参数对锯切温度场的影响规律;Yan Wang 等^[8]在压痕断裂力学的基础上建立了金刚石线切割单晶硅的有限元模型,对单晶硅亚表面损伤深度进行仿真并验证。

然而,当前对于单晶硅表面粗糙度的有限元仿真研究还比较少。为了更好地了解超声振动辅助切割单晶硅对硅片的表面粗糙度的影响,本研究利用 ABAQUS 有限元分析软件,通过响应面法(RSM)研究单颗磨粒在不同工艺参数作用下对单晶硅表面粗糙度的影响,为金刚石线切割单晶硅实验提供理论支持。

1 有限元建模

1.1 模型建立

由于单颗磨粒在切割单晶硅时的压入深入极小,切割过程中产生的切割尺寸远小于工件尺寸,因此可通过用二维平面的磨粒切割模型代替三维空间的磨粒切割模型来减小模型计算的规模,提高计算效率。本研究采用 mm-t-s 单位制进行模型参数的定义。有限元仿真所建立的单晶硅工件模型的尺寸为 1 mm×0.8 mm,单晶硅的切入深度为 0.01 mm,磨粒距离单晶硅 0.04 mm。

在网格的划分中,为了降低计算的复杂程度以及时长,将磨粒实际能够切割到的单晶硅部分以 0.004 mm 的尺寸划分网格,其余部分以 0.200 mm 的尺寸划分网格,使用四边形单元划分后获

得有 13 250 个单元的单晶硅工件网格模型。

在边界条件设置中,由于金刚石磨粒的硬度远大于单晶硅的硬度,且磨粒尺寸极小,切割过程中的变形也极小,所以将金刚石磨粒设为刚体;因为单晶硅在切割时为固定不动,所以将单晶硅模型的底边设为完全固定。

在载荷设置中,利用如式(1)所示的傅里叶级数公式设置超声振动的周期幅值,其中圆频率 $\omega = 2\pi f = 125\ 600\ \text{Hz}$,由于采用正弦的周期幅值,开始时间、初始幅值和余弦幅值 A 都设为 0,并在磨粒和单晶硅工件上设置磨粒的移动速度和超声幅值所对应的振动位移。

$$\begin{cases} a = A_0 + \sum_{n=1}^N [A_n \cos n\omega(t - t_0) + B_n \sin n\omega(t - t_0)], & t \geq t_0 \\ a = A_0, & t < t_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, ω 为圆频率, $\omega = 2\pi f$, A_0 为初始幅值。

1.2 材料属性

金刚石磨粒的杨氏模量取 $1.05 \times 10^6\ \text{MPa}$,泊松比取 0.2,密度取 $3.5 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$;单晶硅的杨氏模量取 $1.93 \times 10^5\ \text{MPa}$,泊松比取 0.28,密度取 $2.3 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$ ^[9]。

现有的单晶硅切割仿真研究中,单晶硅的材料属性设定主要有两种。第一种为 Venkatachalam S 等^[10]采用的 J-C 本构模型(Johnson-Cook),第二种为赵成博等^[11]采用的脆性开裂本构模型(brittle cracking),其中,J-C 本构需要假定单晶硅在延展性加工过程中存在明显的材料流动,更适用于金属材料;脆性开裂本构模型的原理是当切削过程中最大主应力超过硬脆材料的最大拉伸强度 σ_t 时,会产生微裂纹,更符合单晶硅的材料属性的设定。脆性断裂本构中断裂能计算公式^[12]和软化曲线图^[12]如式(2)和图 1 所示。取断裂韧性值^[13] $K_c = 0.968\ \text{GPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$,代入式(2)可求得断裂能 $G_f^I = 7.68 \times 10^{-3}\ \text{MPa} \cdot \text{mm}$,根据图 1 所示的软化曲线图,可以得出断裂位移 $u_0 = 6.4 \times 10^{-5}\ \text{mm}$ 。

$$G_f^I = \frac{K_c^2(1-\mu^2)}{E} \quad (2)$$

其中, K_c 为断裂韧性, μ 为泊松比, E 为杨氏模量。

1.3 仿真可行性

本研究利用单颗磨粒切割单晶硅工件来模拟

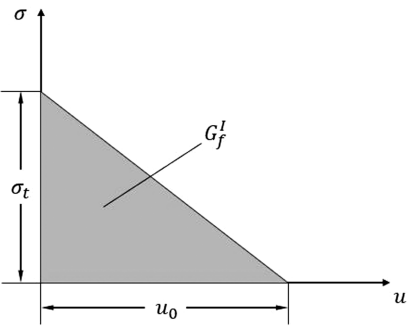


图 1 软化曲线图
Fig.1 Softening curve

金刚石线切割单晶硅棒,在实际切割中有些情况无法通过有限元仿真模拟出来,所以需要做以下几项规定:

(1)实际切割中,金刚石线有一定的进给速度。但在单颗磨粒切割单晶硅工件的仿真中,因为磨粒运动速度为 28~35 m/s,单晶硅工件长度为 1 mm,切割过程十分短暂,所以进给速度的影响几乎为 0。因此,仿真过程中忽略进给速度这一影响因素。

(2)实际切割过程中,金刚石线会产生一定量的线弓,从而会改变金刚石线的张紧力,但线弓并不影响作用在单晶硅棒上的超声波。对于单颗磨粒而言,线弓导致的张紧力的变化也无法通过仿真模拟出来,所以忽略线弓产生的影响。

2 响应面设计及分析

2.1 响应面法设计与结果

曲面响应法(RSM)一般包括 Box-Behnken 试验设计(BBD)和中心复合设计(central composite design,CCD)。两者相比,BBD 的设计点相对较少,

其运行成本比相同数量因子的 CCD 的运行成本低,采用 BBD 能够更好节省试验步骤,并且还能确保所有因子不会同时设置在高水平。因此本研究选用 Box-Behnken 试验设计来研究单颗磨粒切割单晶硅的参数超声频率 f 、超声振幅 A_z 、磨粒速度 v_l 、磨粒倾角 θ 和磨粒半锥角 φ 对单晶硅表面粗糙度的影响规律。各参数的含义如图 2 所示;BBD 设计因素及水平如表 1 所示;试验方案及结果如表 2 所示。

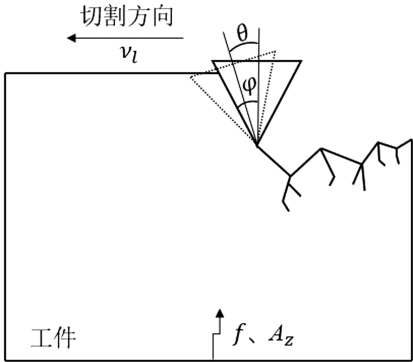


图 2 单颗磨粒切割参数示意图
Fig.2 Schematic diagram of cutting parameters of a single abrasive grain

为了得到工件表面粗糙度与超声频率、超声振幅、磨粒速度、磨粒倾角和磨粒半锥角之间的关系,对表 2 的数据进行多元回归分析,获得表面粗糙度拟合模型的回归方程如式(3)所示。

$$R_a = +0.007\ 2 - 0.000\ 2\beta_1 + 0.000\ 1\beta_2 + 0.000\ 1\beta_3 + 0.000\ 2\beta_4 - 0.000\ 3\beta_5 + 0.000\ 2\beta_{11} + 0.000\ 1\beta_{22} + 0.000\ 1\beta_{33} - 0.000\ 4\beta_{44} - 0.000\ 3\beta_{55} - 0.000\ 2\beta_{12} - 0.000\ 1\beta_{13} - 0.000\ 1\beta_{15} - 0.000\ 3\beta_{23} - 0.000\ 4\beta_{24} + 0.000\ 4\beta_{45}$$

(3)

表 1 BBD 设计因素及水平

Tab.1 BBD design factors and levels

水平	超声频率 f/kHz	超声振幅 $A_z/\mu\text{m}$	磨粒速度 $v_l/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	磨粒倾角 $\theta/(\circ)$	磨粒半锥角 $\varphi/(\circ)$
-1	20	10	28.0	-15	30
0	30	15	31.5	0	45
1	40	20	35.0	15	60

表 2 BBD 响应面试验方案以及结果

Tab.2 BBD response surface test scheme and results

序号	超声频率 f/kHz	超声振幅 $A_z/\mu\text{m}$	磨粒速度 $v_l/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	磨粒倾角 $\theta/(\circ)$	磨粒半锥角 $\varphi/(\circ)$	表面粗糙度 R_a/mm
1	40	15	31.5	-15	45	0.006 3

续表

序号	超声频率 f/kHz	超声振幅 $A_z/\mu\text{m}$	磨粒速度 $v_l/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	磨粒倾角 $\theta/(\text{^\circ})$	磨粒半锥角 $\varphi/(\text{^\circ})$	表面粗糙度 R_a/mm
2	30	20	31.5	-15	45	0.007 3
3	40	15	31.5	0	60	0.006 5
4	30	15	28.0	-15	45	0.006 6
5	30	10	31.5	0	60	0.006 7
6	20	15	31.5	-15	45	0.006 9
7	20	20	31.5	0	45	0.008 0
8	30	20	35.0	0	45	0.007 3
9	20	10	31.5	0	45	0.007 4
10	20	15	31.5	0	60	0.007 1
11	30	15	28.0	0	30	0.007 2
12	30	20	31.5	0	60	0.006 9
13	30	15	35.0	15	45	0.007 5
14	30	15	31.5	-15	60	0.005 5
15	40	15	31.5	0	30	0.007 5
16	30	10	31.5	-15	45	0.006 0
17	30	20	31.5	0	30	0.007 2
18	30	15	31.5	0	45	0.007 4
19	40	10	31.5	0	45	0.007 5
20	20	15	28.0	0	45	0.007 6
21	30	15	35.0	-15	45	0.007 0
22	30	10	28.0	0	45	0.007 0
23	40	15	28.0	0	45	0.007 2
24	40	15	35.0	0	45	0.007 1
25	40	20	31.5	0	45	0.007 4
26	20	15	31.5	0	30	0.007 6
27	30	15	31.5	0	45	0.007 0
28	30	10	35.0	0	45	0.007 9
29	30	15	31.5	0	45	0.007 3
30	30	15	35.0	0	30	0.007 3
31	30	15	31.5	15	30	0.006 7
32	30	20	28.0	0	45	0.007 5
33	30	20	31.5	15	45	0.007 0
34	30	15	31.5	15	60	0.006 6
35	30	15	28.0	0	60	0.006 5
36	30	15	31.5	-15	30	0.007 1
37	30	10	31.5	15	45	0.007 2
38	30	10	31.5	0	30	0.006 9
39	40	15	31.5	15	45	0.006 8
40	20	15	31.5	15	45	0.007 1
41	30	15	28.0	15	45	0.007 4
42	20	15	35.0	0	45	0.007 9

续表

序号	超声频率 f/kHz	超声振幅 $A_z/\mu\text{m}$	磨粒速度 $v_l/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	磨粒倾角 $\theta/(\text{^\circ})$	磨粒半锥角 $\varphi/(\text{^\circ})$	表面粗糙度 R_a/mm
43	30	15	35.0	0	60	0.006 7
44	30	15	31.5	0	45	0.007 2
45	30	15	31.5	0	45	0.007 2
46	30	15	31.5	0	45	0.007 1

为了对表面粗糙度拟合模型的拟合质量进行评估,通常对拟合模型进行方差分析,如表 3 所示。在许多领域的方差分析研究中,误差 $P=0.05$ 被认为是可以接受误差的最大边界水平, P 值越小误差越小。由表 3 可知:

(1) 试验所选取的粗糙度拟合模型的 P 值小于 0.000 1 远低于 $P<0.01$ 水平,表示该实验所选取的粗糙度拟合模型达到了极为显著的水平。模型的失拟项 $P=0.193\ 2>0.05$,达到不显著水平。

(2) 因复相关系数 $R^2=0.886\ 0$,说明了预测

值和试验值有很高的相关性,并且拟合过程度良好、试验误差较小,可以通过拟合模型解释 88.69% 的实际粗糙度试验结果。校正系数 $R^2_{\text{Adj}}=0.823\ 0$,与 R^2 数值接近,表明模型有充分的通用性。

(3) 由方差分析表中各项所对应的 F 值可知,各因素对单晶硅表面粗糙度的影响显著性顺序依次为:磨粒半锥角>磨粒倾角>超声频率>超声振幅>磨粒速度。

表 3 粗糙度拟合模型方差分析表
Tab.3 Variance analysis of roughness fitting model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	9.005×10^{-6}	16	5.628×10^{-7}	14.08	$<0.000\ 1$
超声频率 f	6.806×10^{-7}	1	6.806×10^{-7}	17.03	0.000 3
超声振幅 A_z	2.500×10^{-7}	1	2.500×10^{-7}	6.25	0.018 3
磨粒速度 v_l	1.806×10^{-7}	1	1.806×10^{-7}	4.52	0.042 2
磨粒倾角 θ	8.100×10^{-7}	1	8.100×10^{-7}	20.26	0.000 1
磨粒半锥角 φ	1.562×10^{-6}	1	1.562×10^{-6}	39.09	$<0.000\ 1$
$f * A_z$	1.225×10^{-7}	1	1.225×10^{-6}	3.06	0.090 6
$f * v_l$	4.000×10^{-8}	1	4.000×10^{-8}	1.00	0.325 4
$f * \varphi$	6.250×10^{-8}	1	6.250×10^{-8}	1.56	0.221 1
$A_z * v_l$	3.025×10^{-7}	1	3.025×10^{-7}	7.57	0.010 1
$A_z * \theta$	5.625×10^{-7}	1	5.625×10^{-7}	14.07	0.000 8
$\theta * \varphi$	5.625×10^{-7}	1	5.625×10^{-7}	14.07	0.000 8
f^2	2.364×10^{-7}	1	2.364×10^{-7}	5.91	0.021 4
A_z^2	9.852×10^{-8}	1	9.852×10^{-8}	2.46	0.127 3
v_l^2	1.909×10^{-7}	1	1.909×10^{-7}	4.78	0.037 1
θ^2	1.470×10^{-6}	1	1.470×10^{-6}	36.78	$<0.000\ 1$
φ^2	9.337×10^{-7}	1	9.337×10^{-7}	23.36	$<0.000\ 1$
残差	1.159×10^{-6}	29	3.997×10^{-8}	—	—
失拟项	1.059×10^{-6}	24	4.413×10^{-8}	2.21	0.193 2
纯误差	1.000×10^{-7}	5	2.000×10^{-8}	—	—
总变异	0.000 0	45	—	—	—
R^2	—	—	—	—	0.886 0
R^2_{Adj}	—	—	—	—	0.823 0
R^2_{pred}	—	—	—	—	0.692 7

2.2 响应曲面模型诊断

用响应模型的残差正态累积分布图来检验模型的优劣,如图 3、图 4。由图 3 可知,残差都在正态分布直线附近,没有异常点,所以可以判定残差呈正态分布,模型是适合的。由图 4 可知,残差是沿着零点均匀分布的,也可以判定该模型是合适的。

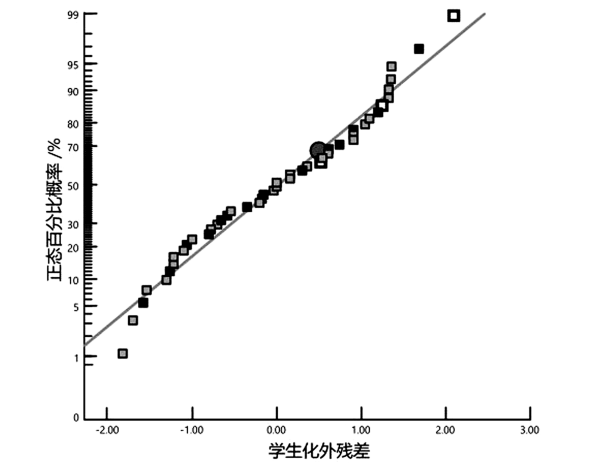


图 3 残差的正态概率图

Fig.3 Normal probability plot of residuals

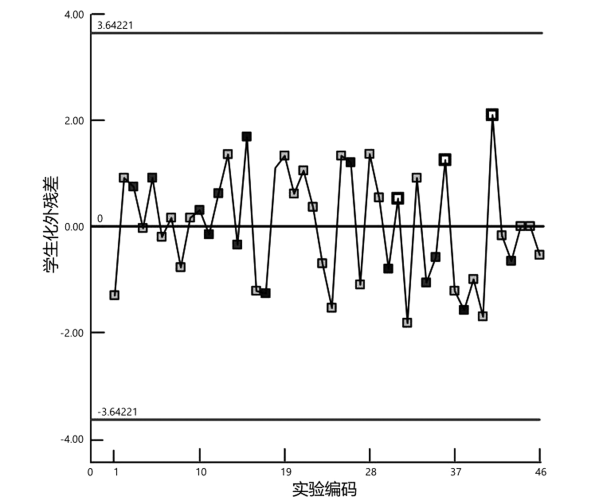


图 4 试验次序的残差图

Fig.4 Residual diagram of test sequence

2.3 响应曲面分析

响应面曲线是由响应值(本研究中为表面粗糙度)和各因子 f 、 A_z 、 v_t 、 θ 、 φ 构成的三维空间曲面图。根据前文中获得的粗糙度拟合模型的回归方程,绘制不同因子对表面粗糙度的影响规律图和响应曲面及其等高线图,结果见图 5、图 6。

分别分析各因素和各因素交互对表面粗糙度的影响。

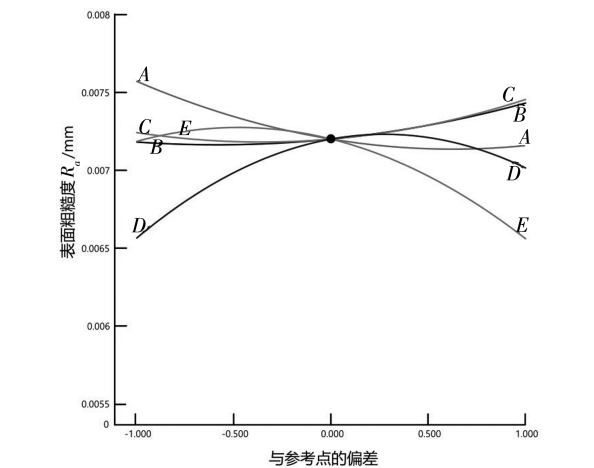


图 5 各因子对表面粗糙度的影响

Fig.5 Influence of various factors on surface roughness

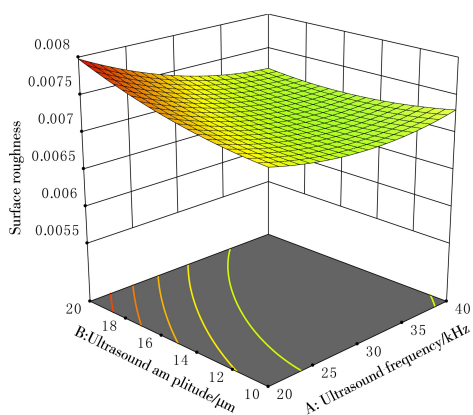
由图 5 中的曲线 A 可知,表面粗糙度随着 A 超声频率的增大而减小,在 -1 到 0 水平(20 ~ 30 kHz),表面粗糙度急剧下降。因为在 30 kHz 时磨粒在单位时间内的纵向速度加快,减少了磨粒与单晶硅的接触时间,使表面粗糙度快速下降;而在 40 kHz 时由于磨粒纵向速度进一步加快,导致磨粒对单晶硅纵向的冲击增大,增大裂纹深度,使表面粗糙度下降缓慢甚至有上升的趋势。

由图 5 中的曲线 B、C 可知,表面粗糙度随着 B 超声振幅和 C 磨粒速度的增大而增大,因为随着超声振幅和磨粒速度的增大,磨粒对单晶硅的纵向和切向冲击力也在增大,导致单晶硅表面裂纹的宽度深度增大,表面粗糙度也随之增大。

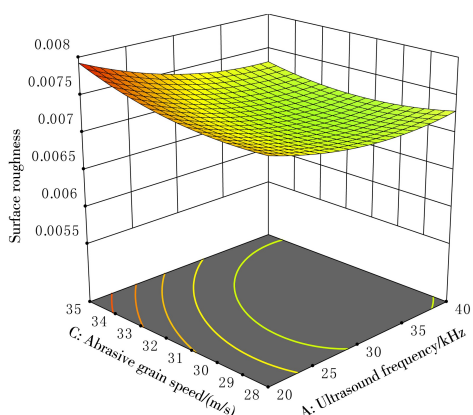
由图 5 中的曲线 D 可知,表面粗糙度随着 D 磨粒倾角的增大而先增大后减小。在 -1 到 0 水平($-15^{\circ} \sim 0^{\circ}$)表面粗糙度急速上升,因为磨粒倾角增大,导致其切向和纵向与单晶硅的接触范围均增大,表面粗糙度急速上升;而在 15° 时,虽然磨粒纵向接触范围减小,但其切向接触范围增大,所以表面粗糙度下降更缓慢。

由图 5 中曲线 E 可知,表面粗糙度随着 E 磨粒半锥角的增大而减小。因为磨粒半锥角的增大,磨粒的锥角越大,产生的裂纹较浅,表面粗糙度因此降低。

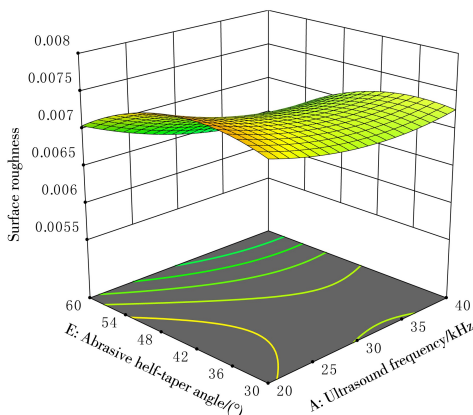
在图 6(a) 和图 6(b) 中,响应曲面呈现中间区域有较低的表面粗糙度,并且在低超声频率及高超声振幅和高磨粒速度的情况下,表面粗糙度急剧上升。这是因为在低超声频率和高超声振幅的情况下,磨粒与单晶硅之间接触的时间更长,材



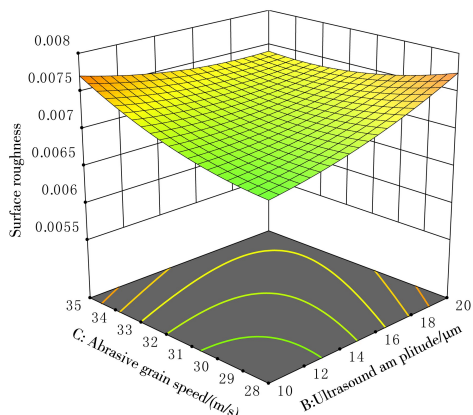
(a) A 超声频率与 B 超声振幅



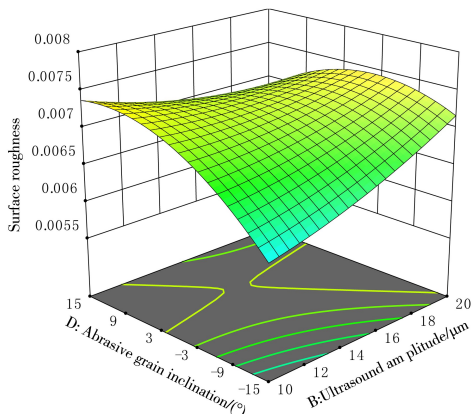
(b) B 超声频率与 C 磨粒速度



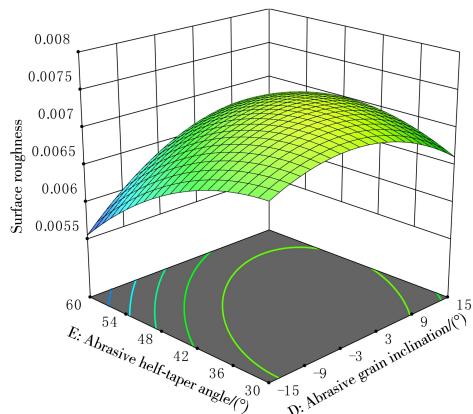
(c) A 超声频率与 E 磨粒半锥角



(d) B 超声振幅与 C 磨粒速度



(e) B 超声振幅与 D 磨粒倾角



(f) D 磨粒倾角与 E 磨粒半锥角

图 6 交互作用对表面粗糙度的影响

Fig.6 Effect of interaction on surface roughness

料去除效果增大,磨粒对单晶硅产生正向冲击力增大,导致表面裂纹深度的增加;在低超声频率和高磨粒速度的情况下,磨粒切向移动速度增大,磨粒对单晶硅的切向冲击力增大,导致表面裂纹宽

度的增加。在图 6(c)中,随着磨粒半锥角的和超声频率的增大,表面粗糙度有较大幅度下降,并且超声频率越大,表面粗糙度越低。
在图 6(d)中,单晶硅表面粗糙度随着超声振

幅和磨粒速度的减小而减小。因为低超声振幅及低磨粒速度,不会对单晶硅产生过大的正向和侧向的冲击力,因而降低了裂纹的深度和宽度,所以有更小的表面粗糙度;但在高超声振幅及高磨粒速度的情况下,单晶硅表面粗糙度会有小幅度下降,这是因为高磨粒速度会减小因高超声振幅产生的裂纹的深度,使表面粗糙度有所下降。在图 6(e)中,响应面曲线呈中间区域有较高的表面粗糙度;总体趋势上单晶硅表面粗糙度随着超声振幅和磨粒倾角的减小而减小。因为超声振幅的减小,单晶硅受到磨粒的正向冲击力随之减小,裂纹产生的深度变浅,而磨粒倾角越小,磨粒与单晶硅接触的边越接近水平,对单晶硅产生的侧向冲击力随之减小,导致裂纹产生的宽度越小,粗糙度因此减小。

由图 6(f)可知,响应面曲线呈现中间区域有较高的表面粗糙度,并在低磨粒倾角和高磨粒半锥角的情况下,有最低的表面粗糙度。这是因为磨粒倾角小,磨粒的左侧倾向于水平,与单晶硅的接触面积减小,单晶硅侧向受到的冲击力越小,粗糙度越小;同理,磨粒半锥角越大,磨粒左侧边越倾向于水平,并且磨粒锥角越钝,产生的裂纹更浅,表面粗糙度越小。

从响应曲面图可以看出,5 个工艺参数中,超声频率、磨粒倾角和磨粒半锥角对单晶硅片表面粗糙度的影响最大。根据 Design-Expert 软件中自带的优化函数 Numerical,对单晶硅表面粗糙度进行优化,得到最优的工艺参数值为超声频率 $f=31\text{ kHz}$, 超声振幅 $A_z=10\text{ }\mu\text{m}$, 磨粒速度 $v_l=28\text{ m/s}$, 磨粒倾角 $\theta=-15^\circ$, 磨粒半锥角 $\varphi=60^\circ$, 满意度为 0.994。

3 实验验证

为了验证上述有限元仿真的有效性,本研究采用 TW350 单晶硅截断机进行切割单晶硅实验,采用带有 15 个振子的超声振动台对单晶硅施加切向的超声波。

由于实验条件原因,磨粒半锥角、磨粒倾角无法作为实验变量,并且超声频率为 31 kHz 的振动板振动力度太小,实验用的单晶硅尺寸过大导致

31 kHz 的振动板无法将硅棒振起,所以实验验证中使用 20 kHz 的振动板进行验证。

通过改变金刚石的线速度分析不同线速度下表面粗糙度影响趋势的一致性来验证有限元仿真的真实性。其中,仿真表面粗糙度和实验表面粗糙度的趋势图如图 7 所示。在不同线速度的作用下,仿真值和实验值的变化趋势是一致的,都是随着线速度的增大而减小;数值上的差异可能是因为仿真的工件尺寸远小于实际单晶硅棒的尺寸,产生的裂纹对于硅棒而言及其细微,但在仿真结果中又较为明显,所以仿真值会偏大。

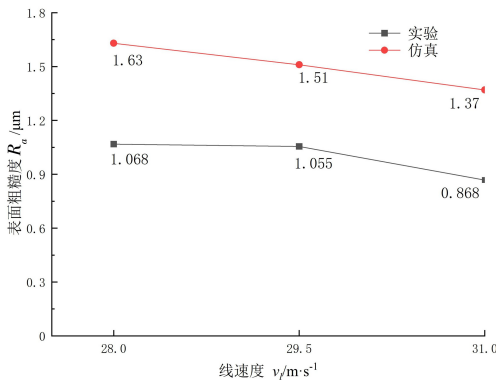


图 7 仿真与实验趋势图

Fig.7 Simulation and experiment trend chart

4 结论

利用 ABAQUS 仿真软件模拟单颗磨粒切割单晶硅的实际情况,并通过建立响应面预测模型,得到单晶硅表面粗糙度的预测模型,结果表明:超声频率、超声振幅、磨粒速度、磨粒倾角和磨粒半锥角对单晶硅表面粗糙度的影响均显著,并通过实验验证其有效性,可得出以下结论:

1)对工艺参数进行目标优化,得到最佳的工艺参数为超声频率 $f=31\text{ kHz}$, 超声振幅 $A_z=10\text{ }\mu\text{m}$, 磨粒速度 $v_l=28\text{ m/s}$, 磨粒倾角 $\theta=-15^\circ$, 磨粒半锥角 $\varphi=60^\circ$, 满意度为 0.994。

2)在不同线速度的作用下,仿真与实验表面粗糙度的变化趋势基本一致,说明有限元仿真的结果在趋势上与真实情况基本吻合,仿真结果可以作为单晶硅切割的理论支持。

参考文献:

[1] NAGARAJA S, CARRARA P, DE LORENZIS L. Experimental characterization and phase-field modeling of anisotropic brittle fracture in silicon[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 293: 109684.
[2] 李淑娟, 万波, 胡超. 基于 RSM 的 SiC 单晶片切割过程多目标优化[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(3): 452-459.

- [3] LI W, JIAO Y, JIANG H Y, et al. Investigation of mechanical force acting on the surface modified-substrate layer area during the chemical-mechanical micro-grinding of monocrystalline silicon[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 228: 107482.
- [4] 冉迪, 苑泽伟, 卞思文, 等. 超声振动辅助切削单晶硅的剥离去除机制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(8): 163-166, 182.
- [5] 张辽远, 王硕, 邵中青, 等. 基于超声振动下电镀金刚石线切割单晶硅材料的实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2013, 33(5): 71-75.
- [6] WANG Y, SONG L X, LIU J G, et al. Investigation on the sawing temperature in ultrasonic vibration assisted diamond wire sawing monocrystalline silicon[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2021, 135: 106070.
- [7] 郭明壮, 王艳, 宋李兴. 超声复合线锯锯切单晶硅的温度场仿真分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(3): 98-102.
- [8] WANG Y, ZHAO B C, HUANG S J, et al. Study on the subsurface damage depth of monocrystalline silicon in ultrasonic vibration assisted diamond wire sawing[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 258: 108077.
- [9] 朱帮迎. 单晶硅超精密切削仿真与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [10] VENKATACHALAM S, LI X P, LIANG S Y. Predictive modeling of transition undeformed chip thickness in ductile-regime micro-machining of single crystal brittle materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(7): 3306-3319.
- [11] 赵博成. 横向超声辅助金刚石线锯切割单晶硅亚表面损伤的研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2021.
- [12] MUCHTAR A, LIM L C, LEE K H. Finite element analysis of vickers indentation cracking processes in brittle solids using elements exhibiting cohesive post-failure behaviour[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(2): 235-243.
- [13] RICKHEY F, MARIMUTHU K P, LEE K, et al. Indentation cracking of monocrystalline silicon considering fracture anisotropy[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 100: 128-138.

(责任编辑: 方素华)

《福建理工大学学报》征稿启事

《福建理工大学学报》是国家新闻出版署批准、福建省教育厅主管、福建理工大学主办的省级综合性学术期刊, 国内外公开发行; 坚持“创新性、科学性、实用性”的办刊方针, 追踪学科前沿研究成果, 展现区域文化特色; 现为双月刊, 每年 6 期(其中理工版 4 期, 社科版 2 期)。中国标准连续出版物号: CN 35-1351/Z; 国际标准连续出版物号: ISSN 2097-3853; 国外发行代号: BM4387。

本刊为中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊, 中国学术期刊综合评价数据来源期刊, 国家哲学社会科学学术期刊数据库, 万方数据库全文收录期刊, 维普资讯《中文科技期刊数据库》全文收录期刊, 超星期刊数据库、龙源期刊网、长江文库全文收录期刊, 台湾华艺 CEPS 中文电子期刊服务数据库全文收录期刊。

一、投稿要求

来稿要求思想正确, 立论科学, 观点鲜明, 论证严密, 论据充分, 资料可靠, 引证恰当, 图表合理, 术语规范, 文字精炼, 具体格式和要求请看本刊网站的“投稿须知”(http://gcxyxb.fjut.edu.cn/Corp/30.aspx)。

二、投稿方式

1. 打开福建理工大学主页(http://www.fjut.edu.cn/)从“学报纵览”进入学报采编系统, 注册登录进行投稿;

2. 直接打开域名(http://gcxyxb.fjut.edu.cn/), 进入学报采编系统, 注册登录进行投稿。

三、投稿约定

1. 来稿须保证合法性和规范性, 坚决反对学术不端行为。
2. 作者可在线查询稿件处理情况。本刊概不收取版面费、审稿费等费用。
3. 稿件一经采用, 其发表权、汇编权、纸型版、网络版及其他电子版的发行权、传播权和复制权交本刊独家使用, 并同意由编辑部统一纳入相关的信息服务系统。

四、本刊联系方式

地址: 福建省福州市闽侯县上街镇学府南路 69 号(邮编: 350118)

电话: 0591-22863076