

# 单晶硅超精密切削工艺参数优化与实验研究

姚同<sup>1</sup> 杨晓京<sup>1</sup> 肖建国<sup>2</sup> 张万清<sup>2</sup> 康杰<sup>2</sup>

(1 昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650500)

(2 云南北方光学科技有限公司, 昆明 650200)

**文 摘** 为提高单点金刚石车削单晶硅的表面质量,以表面粗糙度为优化目标设计正交切削实验,通过方差分析、响应曲面分析和极差分析研究主轴转速、进给速度和切削深度对表面粗糙度的影响。结果表明,主轴转速对表面粗糙度影响最显著,主轴转速越大,表面粗糙度值越小;建立了表面粗糙度回归模型,通过响应曲面分析得到主轴转速和进给速度的交互作用对表面粗糙度的影响最大;在最优切削参数组合为主轴转速3 300 r/min、进给速度2 mm/min、切削深度5  $\mu\text{m}$ 的条件下,获得了表面粗糙度 $Ra$  2.7 nm的高质量单晶硅元件,其表面相对光滑,切屑呈带状,材料在延性域内去除。

**关键词** 单晶硅,单点金刚石车削,切削参数,表面粗糙度

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.008

## Experimental Investigations on the Ultra Precision Cutting of Single-crystal Silicon for Optimal Process Parameters

YAO Tong<sup>1</sup> YANG Xiaojing<sup>1</sup> XIAO Jiaoguo<sup>2</sup> ZHANG Wangqing<sup>2</sup> KANG Jie<sup>2</sup>

(1 Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

(2 Yunnan KIRO Photonics Co. Ltd, Kunming 650200)

**Abstract** In order to improve the surface quality of single-crystal silicon by single-point diamond turning in the direction of surface roughness optimization, orthogonal cutting experiment are designed. The effects of spindle speed, feed speed and cutting depth on surface roughness are studied by variance analysis, response surface analysis and range analysis. The results show that the spindle speed has a significant effect on the surface roughness, and the larger the spindle speed is, the smaller the surface roughness value is. The regression model of surface roughness is established. The interaction of spindle speed and feed speed has the greatest influence on the surface roughness by response surface analysis. High-quality single-crystal silicon element with a surface roughness of  $Ra$  2.7 nm is obtained with the optimal combination of cutting parameters of 3300 r/min spindle speed, 2 mm/min feed rate and 5  $\mu\text{m}$  depth of cut. Relatively smooth surface and the banded chip is observed. The material is removed in the ductile state.

**Key words** Single-crystal silicon, Single-point diamond turning (SPDT), Cutting parameters, Surface roughness

### 0 引言

单晶硅具有导热性好、耐高温、抗辐射以及高红外透过率和折射率高等特性,是制造红外透镜、光学发射器等光学元件的首选材料之一<sup>[1-2]</sup>,广泛应用于航空航天、空间光学、太阳能行业等领域。然而,单晶硅是典型的硬脆材料,传统的精密研磨方式加工效率低,且在选择加工参数不合理的情况下工件表面易出现破碎<sup>[3]</sup>。单点金刚石切削技术 (SPDT) 被广

泛应用于红外光学元件的加工,其加工精度和生产效率高,加工后的工件表面粗糙度可达到纳米级<sup>[4]</sup>。

在 SPDT 加工单晶硅的过程中依然会出现一些问题,例如会在工件表面产生滑移位错,在亚表层造成中断裂纹等损伤和缺陷,并对金刚石刀具造成过度磨损<sup>[5]</sup>。切削参数的优化是提高 SPDT 加工效率的关键,会影响切削力、刀具磨损以及表面粗糙度<sup>[6]</sup>。李峰等<sup>[7]</sup>通过正交试验研究了铣削参数对 TiAl 合金

收稿日期:2021-06-07

基金项目:国家自然科学基金(51765027)

第一作者简介:姚同,1997年出生,硕士研究生,主要从事超精密切削加工研究。E-mail:379131771@qq.com

通信作者:杨晓京,1971年出生,教授,主要从事数字化设计与制造及超精密加工研究。E-mail:xjyang@vip.sina.com

表面裂纹的影响,基于遗传算法,优化得到最优铣削参数组合。尹浩等<sup>[8]</sup>通过有限元仿真和实验研究切削参数对TC4合金切削力、切削温度的影响。I. ABUBAKAR等<sup>[9]</sup>通过方差分析了切削参数对单晶硅表面粗糙度的影响。B. LIU等<sup>[10]</sup>认为单晶硅的延性去除可以通过严格控制切削参数来实现,可提高加工效率;他们使用特殊设计的纳米切削平台和扫描电子显微镜进行纳米切削实验,研究单晶硅在脆性模式下材料的去除行为以及晶向和刀具半径对脆塑转变临界厚度的影响。N. KHATRI等<sup>[11]</sup>通过分子动力学模拟和实验研究相结合模拟研究了单晶硅切削过程中不同切削参数下相变、切削力以及切削温度的变化,阐明了切削参数在影响单晶硅切削过程中延性域加工条件的显著性。B. LIU等<sup>[12]</sup>通过有限元分析研究了单晶硅微切削过程中的材料去除行为以及切屑的形成机理以及切削过程中的切削力和切削热。I. ABUBAKAR等<sup>[13]</sup>通过响应面分析和期望函数法对单晶硅的切削过程进行预测建模,确定最佳切削条件,以实现最小表面粗糙度和刀具磨损以及最大材料去除率。

本文针对单晶硅材料设计了三因素四水平的正交切削实验,分析切削参数对表面粗糙度的影响,应用方差分析、响应曲面分析以及极差分析,对影响工件表面粗糙度的因素进行显著性表征,并分析获得一组最优切削参数组合,为单晶硅实际加工提供理论基础和技术参考。

## 1 实验

### 1.1 材料及设备

本研究采用表面晶向为(100)的单晶硅片为切削表面,材料来源于北方驰宏光电有限公司采用直拉法制备,通过单面化学机械抛光法处理,工件尺寸为 $\Phi 25.4\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。

车削实验在德国Innolite的IL600单点金刚石车床上进行,机床最大转速6000 r/min,实验设备如图1所示;实验采用刀尖圆弧半径为0.5 mm,前角为 $-25^\circ$ ,后角为 $10^\circ$ 的金刚石刀具。

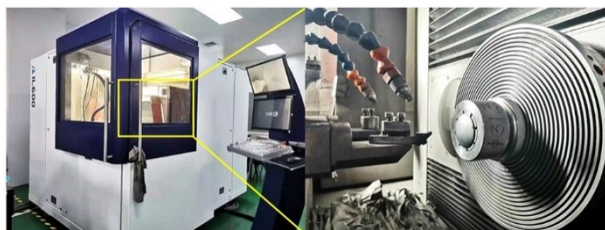


图1 加工单晶硅材料的单点金刚石车床

Fig. 1 Single point diamond lathe for turning single-crystal silicon

### 1.2 实验方案

单晶硅材料使用弹性夹具装夹,真空吸附于旋转主轴,金刚石刀具固定于工作台上。实验设定刀具为直线移动(x轴),工件随主轴旋转(c轴)(图2),通过c-x两轴联动,对材料进行去除。

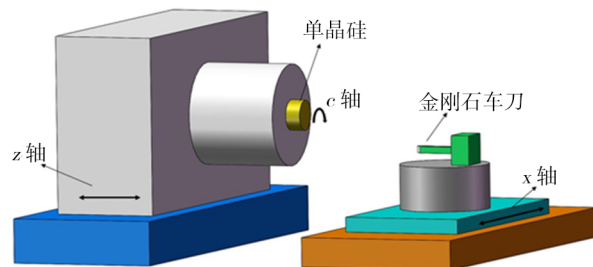


图2 车削加工示意图

Fig. 2 Turning process schematic

切削实验是对单晶硅材料表面进行一系列端面加工,选择不同切削参数以实现延性域加工。本研究采用 $L_{16}(4^3)$ 正交表进行正交实验,实验参数见表1。切削实验全程在连续冷却条件下进行,分别研究切削参数对表面粗糙度的影响。每组切削实验完成后采用Taylor Hobson PGI 1240接触式机械轮廓仪分别从3个不同方向对表面粗糙度 $R_a$ 值进行测量,取平均值作为实验有效值。检测设备如图3所示。

表1 实验加工参数

Tab. 1 Experimental processing parameters

因素	$n/r \cdot \text{min}^{-1}$	$f/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$a_p/\mu\text{m}$	$t/^\circ\text{C}$
1	1000	2	5	20
2	1500	6	15	
3	2400	10	25	
4	3300	14	35	

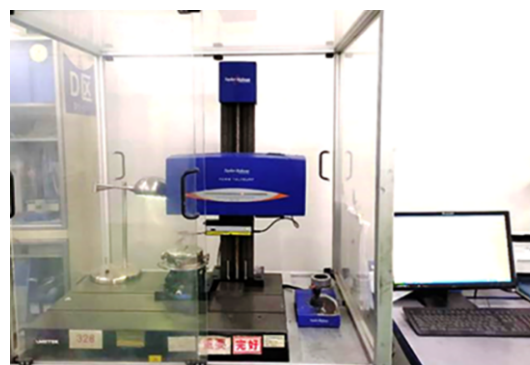


图3 Taylor Hobson 轮廓仪

Fig. 3 Contact mechanical profilometer by Taylor Hobson

## 2 结果与分析

本文共进行16组切削参数加工单晶硅实验,方案与结果如表2所示,综合分析各切削参数对加工后工件表面粗糙度的影响。

表2 正交实验方案及结果

Tab. 2 Orthogonal experimental scheme and results

No.	$n/r \cdot \text{min}^{-1}$	$f/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$a_p/\mu\text{m}$	$Ra/\text{nm}$
1	1000	2	5	3.5
2	1000	6	15	21.5
3	1000	10	25	48.8
4	1000	14	35	57.2
5	1500	2	15	3.13
6	1500	6	5	3.1
7	1500	10	35	7.8
8	1500	14	25	16.4
9	2400	2	25	3.2
10	2400	6	35	2.9
11	2400	10	5	4.3
12	2400	14	15	6.1
13	3300	2	35	2.9
14	3300	6	25	3.1
15	3300	10	10	3.4
16	3300	14	5	4.2

### 2.1 切削参数对表面粗糙度的影响

加工后工件表面粗糙度值随切削参数的变化趋势见图4。表面粗糙度随主轴转速增大而减小,随进给速度的增大而增大;当切削深度增加时,表面粗糙度的变化趋于平缓。在加工时,选择较高的转速、较低的进给速度和切削深度,将得到较好的表面质量。

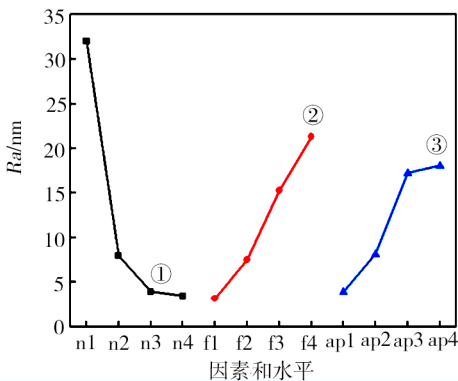


图4 表面粗糙度随各水平变化趋势

Fig. 4 Surface roughness change with different levels

图4点线①为表面粗糙度随主轴转速的变化趋势。表面粗糙度随主轴转速的增加大幅度降低,这是由于当主轴转速较低时,排屑速度减慢,使得切屑

$$\ln Ra = 1.989 - 0.0027n + 0.396f + 0.165a_p - 8.806 \times 10^{-5}nf - 6.792 \times 10^{-3}fa_p + 6.506 \times 10^{-7}n^2 - 1.674 \times 10^{-3}a_p^2 \quad (1)$$

借助残差正态概率图(图5)进一步确认该模型的准确性,残差越小,回归模型越准确。可见残差点有规律地沿直线分布,证明残差为正态分布,模型与实验结果拟合效果良好<sup>[14-15]</sup>。以切削参数中任意两

堆积,从而对工件表面产生损伤,影响表面质量。另一方面,在主轴转速增大的过程中,刀具前刀面附近切削范围内的摩擦和变形减小,使得切削过程中切削力减小,从而使刀具-工件系统振动减弱,进而提高单晶硅的表面质量。由图4可以看出,当主轴转速超过2400 r/min时,表面粗糙度变化较小,说明在一定区域内主轴转速的增大可以提高单晶硅的表面质量,但超过某一数值后,主轴转速的提高对改善其表面质量的影响不大。

图4点线②为表面粗糙度随进给速度的变化趋势。当进给速度增大时,由于尺寸效应,剪切角变小甚至消失,导致切削力增大,使材料出现脆性断裂,最终获得较差的表面质量。另一方面,单晶硅是典型的硬脆材料,进给速度的增加会使切削温度急剧升高,从而使得刀具磨损加剧,表面质量降低。

图4点线③为表面粗糙度随切削深度的变化趋势。切削深度取值间隔为10 nm,随切削深度的增加表面粗糙度逐渐增大。这是由于切削深度增加,使得切削层面积增大,刀具-工件间的摩擦加大,进而切削力增大。另一方面,切削深度的增加会使切屑变形增大,切削温度升高,在切屑还未完全剥离工件表面时粘附在工件表面,最终导致表面粗糙度增加。

### 2.2 表面粗糙度方差分析

对正交实验中表面粗糙度进行方差分析,由表3可知,切削参数对表面粗糙度影响的显著性依次为:主轴转速>进给速度>切削深度。

表3 方差分析  
Tab. 3 Variance analysis

差异源	离差平方和	自由度	均方根	F值	贡献率/%
$n$	2343.315	3	781.105	15.076	54.48
$f$	775.294	3	258.431	4.988	15.43
$a_p$	586.705	3	195.568	3.775	10.74
误差	310.869	6	51.811		19.35
总和	4016.184	15	1286.92		100

### 2.3 表面粗糙度响应曲面分析

为探究切削参数对表面粗糙度的交互作用,采用Design-Expert对正交试验中的表面粗糙度进行响应回归分析,使用二次项模型对表面粗糙度进行非线性拟合,得到表面粗糙度与切削参数的数学模型:

个参数作为影响因素,绘制表面粗糙度的响应曲面,见图6,主轴转速和进给速度的交互作用对表面粗糙度影响最大,较高的主轴转速和较低的进给速度可以获得较低的表面粗糙度值[图6(a)]。因此,在加

工实验中,要特别注意主轴转速和进给速度的选择。

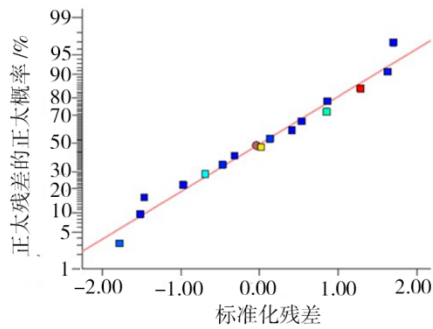
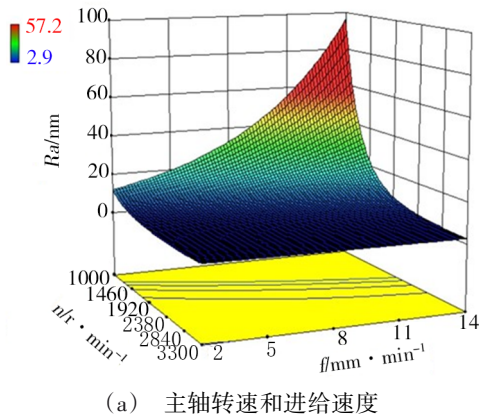
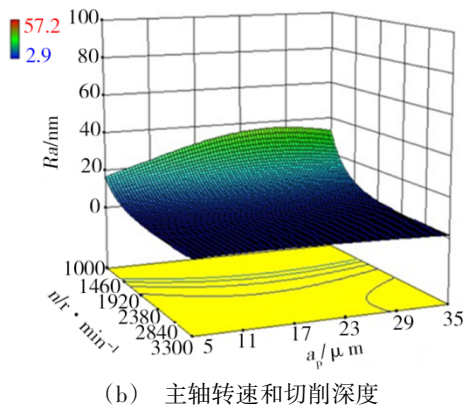


图5 回归模型残差正态概率图

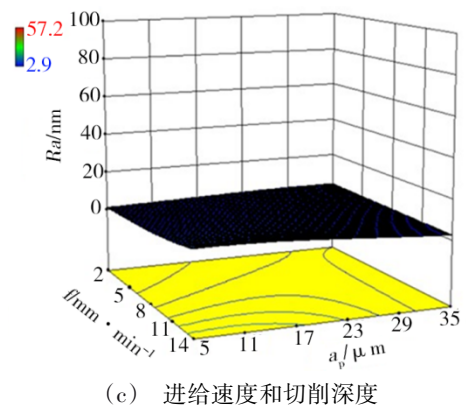
Fig. 5 Normal probability plot of the residuals



(a) 主轴转速和进给速度



(b) 主轴转速和切削深度



(c) 进给速度和切削深度

图6 表面粗糙度的响应曲面图

Fig. 6 Contour plot of surface roughness response

## 2.4 表面粗糙度极差分析

为探究切削参数对表面粗糙度的影响程度以及得到最优参数组合,对正交实验中表面粗糙度进行极差分析,结果见表4。各因素对加工后工件表面粗糙度的影响程度,按升序排列为切削深度 $a_p$ 、进给速度 $f$ 、主轴转速 $n$ ,最优参数组合为 $n_4 f_1 a_{p1}$ ,即 $n=3\ 300$  r/min、 $f=2$  mm/min、 $a_p=5$   $\mu$ m。

表4 极差分析

Tab. 4 Range analysis

水平/因素	$n$	$f$	$a_p$
1	32.75	3.183	3.775
2	7.608	7.65	8.533
3	4.125	16.075	17.875
4	3.4	20.975	17.7
Max-min R	29.35	17.793	14.1

## 2.5 最优切削参数加工实验

为验证本文研究的有效性,进行最优切削参数加工实验: $n=3\ 300$  r/min、 $f=2$  mm/min、 $a_p=5$   $\mu$ m。采用轮廓仪测量,工件表面粗糙度可达到2.7 nm(图7)。采用扫描电镜观察表面形貌,其表面相对光滑,表面质量较好(图8)。在扫描电镜下对加工过程中收集的单晶硅切屑进行观测,切屑呈连续带状,材料在延性域内去除(图9)。

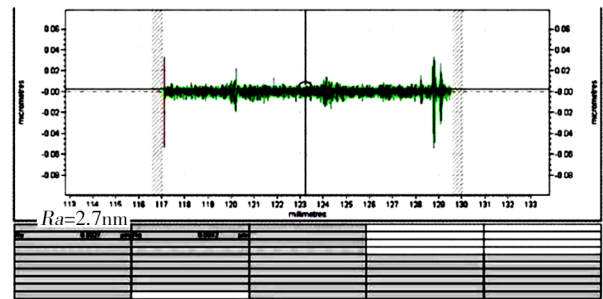


图7 最优切削参数下的表面粗糙度

Fig. 7 Surface roughness under optimal cutting parameters

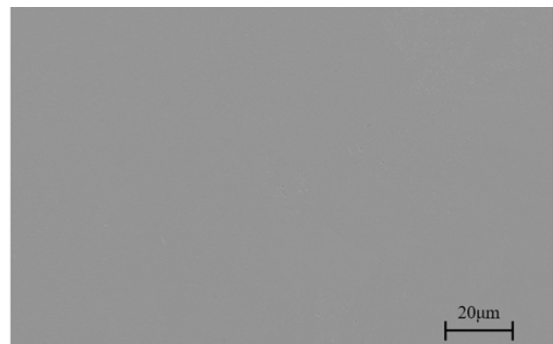


图8 最优切削参数下的表面形貌

Fig. 8 Surface topography under optimal cutting parameters

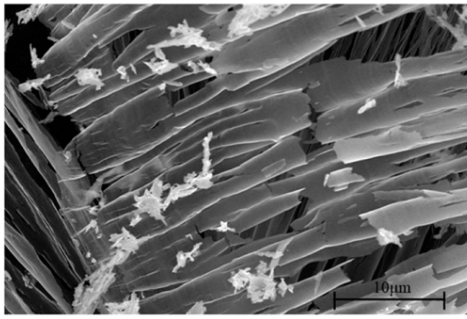


图9 最优切削参数下单晶硅切屑形貌  
Fig. 9 Chip morphology of Single-crystal silicon under optimal cutting parameters

### 3 结论

本文采用正交切削实验研究了切削参数对单晶硅表面粗糙度的影响规律。得到以下结论：

(1) 主轴转速是影响表面粗糙度的主要因素, 主轴转速在一定范围内越快, 其表面粗糙度越低, 表面粗糙度随进给速度的增加几乎呈线性增大, 切削深度对表面粗糙度的影响最小;

(2) 建立了切削参数和表面粗糙度之间的回归模型, 通过响应曲面分析得到主轴转速和进给速度的交互作用对表面粗糙度的影响最大;

(3) 最优切削参数组合为主轴转速 3 300 r/min, 进给速度 2 mm/min, 切削深度 5  $\mu\text{m}$ , 在此条件下加工后的工件表面粗糙度达  $Ra2.7 \text{ nm}$ 。

### 参考文献

[1] HYUN W J, SECOR E B, HERSAM M C, et al. High-resolution patterning of graphene by screen printing with a silicon stencil for highly flexible printed electronics [J]. *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.), 2015, 27(1): 109–115.

[2] ABOU-EL-HOSSEIN K. Quality of silicon convex lenses fabricated by ultra-high precision diamond machining [J]. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2013, 24(1): 91–97.

[3] ZHANG J J, HAN L, ZHANG J G, et al. Brittle-to-ductile transition in elliptical vibration-assisted diamond cutting of reaction-bonded silicon carbide [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45(C): 670–681.

[4] 许宏淮. 单点金刚石车削加工脆性光学材料表面粗糙度的控制研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2012.

XU H H. Study on surface roughness control of brittle optical material in single point diamond turning [D]. Shanghai: Fudan University, 2012.

[5] 马振中. 单晶硅各向异性超精密切削仿真与实验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2019.

MA Z Z. Simulation and experimental research on anisotropic ultra-precision cutting of single crystal silicon [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.

[6] GOEL S, LUO X C, ROBERT L R. Wear mechanism of diamond tools against single crystal silicon in single point diamond turning process [J]. *Tribology International*, 2013, 57: 272–281.

[7] 李锋, 赵东平, 王博, 等. 基于最小加工表面裂纹的 TiAl 合金铣削参数优化 [J]. *宇航材料工艺*, 2020, 50(02): 22–26.

LI F, ZHAO D P, WANG B, et al. Optimization of milling parameters of tial alloy based on the minimum machined surface cracks [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2020, 50(02): 22–26.

[8] 尹浩, 郑雷. 切削参数对 TC4 切削结果影响的仿真和试验研究 [J]. *有色金属工程*, 2018, 8(04): 13–18.

YIN H, ZHENG L. Simulation and test research of influence of cutting parameters on TC4 cutting results [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2020, 10(05): 22–27.

[9] ABUBAKAR I, KHALED A. Effects of cutting parameters on surface finish quality of ultra-high precision diamond-turned optical grade single-crystal silicon [J]. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2020, 9(4): 541–547.

[10] LIU B, XU Z W, CHEN C, et al. In situ experimental study on material removal behaviour of single-crystal silicon in nanocutting [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 152: 378–383.

[11] KHATRI N, GARG H, KARAR V. Experimental and simulation study of nanometric cutting of silicon by diamond turning [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(11): 23984–23993.

[12] LIU B, LI S W, LI R, et al. Finite element simulation and experimental research on microcutting mechanism of single crystal silicon [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 110(3–4): 909–918.

[13] ABUBAKAR I J, KHALED A, LUKMAN N A, et al. Predictive modeling and multiobjective optimization of diamond turning process of single-crystal silicon using RSM and desirability function approach [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(9–12): 4205–4220.

[14] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法及数据分析 [M]. 化学工业出版社, 2012.

HE W, XUE W D, TANG B. Optimized experimental design method and data analysis [M]. Chemical Industrial Engineering Press, 2012.

[15] 蒙哥马利, 傅钰生. 实验设计与分析 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.

MONTGOMERY D C, FU Y S. Experimental design and analysis [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2009.