

文章编号 1004-924X(2015)增-0439-08

光学晶体超精密飞切加工的切削力测试

王振忠¹, 杨旭^{1,2*}, 张剑锋², 安晨辉², 彭云峰¹

(1. 厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005;

2. 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要:建立了光学晶体切削力与加工参数关系的预测模型指导光学加工,以减小光学晶体飞切加工中的冲击现象,改善晶体表面质量,减小刀具磨损。根据飞切加工原理,应用响应曲面法建立了光学晶体的切削力预测模型;采用田口正交设计方法设计实验参数,对光学晶体的切削力进行测试实验。然后,运用实验参数求解出切削力模型,采用方差分析技术、 R^2 值及残差分析技术分析了切削力预测模型的正确性,以及各参数对切削力的影响。最后,对切削力预测模型进行实验验证。实验结果表明:预测模型完全满足 95%的置信水平,具有良好的预测能力,预测精度达 2.5%。切削力随着主轴转速的增大而减小,随着进给速度和切削深度的增大而增大,切削深度和主轴转速是切削力的主要影响因素,进给速度带来的影响最小。在精加工过程中,应尽量增大主轴转速,减小切削深度,在 180 $\mu\text{m/s}$ 范围内,进给速度可根据加工效率进行调整。

关键词:超精密飞切;光学晶体;切削力;响应曲面法;预测模型

中图分类号:O786 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0439

Cutting force test for ultra-precision flycutting optical crystal

WANG Zhen-zhong¹, YANG Xu^{1,2*}, ZHANG Jian-feng², AN Chen-hui², PENG Yun-feng¹

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering,

Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Chengdu Fine Optic Engineering Research Center, Chengdu 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: flyrainyx@163.com

Abstract: To reduce the impact phenomenon in flycutting machining of an optical crystal and to improve the surface quality of the optical crystal, a prediction model was set up experimentally for the relationship between cutting force and machining parameters. Based on the processing principle of flycutting machining, the prediction model for cutting force was built by response surface methodology (RSM). Then, a cutting force experiment for the optical crystal was conducted under the parameters designed by Taguchi method. After that, the prediction model was achieved by using the experimental data, and the accuracy of the model was analyzed by analysis of variance (ANOVA), R^2 value and residual analysis. In addition, the influences of machining parameters on the cutting force were analyzed. Finally, validation tests were conducted to verify the model. Experimental results demonstrate that the model is adequate at 95% confidence level, and its accuracy is better than 2.5%. Further-

收稿日期:2015-04-03;修订日期:2015-05-10.

基金项目:国家重大科技专项资助项目(No. 2013ZX04006011-102-001)

more, the cutting force decreases with the increases of spindle speed, while increases with the increase of feed rate and cutting depth. Moreover, the cutting depth and spindle speed are the main factors on cutting force, whereas the feed rate has the smallest influence. In the finish machining of optical crystal, the spindle speed should be as large as possible, while the cutting depth should be decreased, and the feed rate can be adjusted by processing efficiency under $180 \mu\text{m/s}$.

Key words: ultra-precision flycutting; optical crystal; cutting force; response surface methodology; prediction model

1 引言

在光学领域,作为大型高功率激光光路中的功能类光学元件,光学晶体具有质软、易碎、易潮解等不利于加工的缺点,而广泛采用单点金刚石超精密切削(Single Point Diamond Turning)的方法^[1-2]。美国最先开发了超精密加工技术,在 20 世纪 50 年代末和 60 年代初,由于航天等尖端技术发展的需要,美国首先发展了金刚石刀具的超精密切削技术,并发展了相应的空气轴承主轴的超精密机床,用于加工激光核聚变反射镜、战术导弹及载人飞船用球面非球面大型零件等。金刚石切削加工技术可避免如磨削和抛光时金刚石颗粒嵌入工件带来的表面损伤,保证光学元件的激光损伤阈值^[3]。

目前国内对软脆性光学晶体的加工主要采用立式铣削的加工方式,加工时由于机床刀盘直径大于工件尺寸,因此为间断性切削加工,刀具在每次切削工件时均会产生冲击作用^[4]。这对刀具的磨损和工件的表面质量均有直接的影响,若切削力过大,会引起机床部件的颤动,在工件上产生明显的波纹现象^[5-6],降低光学元件的激光损伤阈值;同时也会使刀具更容易磨损^[7-8],影响加工质量。

本文通过对光学晶体飞切加工的切削力进行测试,建立切削力的预测模型,可为加工过程中加工参数的选择提供理论依据。

2 切削力模型

为达到较高的加工精度,超精密切削机床的结构较为简单,主要由主轴系统和进给系统组成,其切削加工过程如图 1 所示。加工过程金刚石刀具随着主轴高速旋转,工件通过真空吸盘吸附在

工作台上,工作台带动工件向前进给,完成切削。

在工件的切削过程中,切削力的来源有两方面:一是切削层材料、切屑和工件表面层材料的弹性变形、塑性变形所产生的抗力;二是刀具与切屑、工件表面间的摩擦阻力^[9]。这些力均可分解到相互垂直的 3 个方向,因此可建立如图 2 所示的切削力模型, x 为切削方向, y 为进给反方向, z 为竖直方向,将切削力分解到这 3 个方向进行整体分析,能更方便的分切削力对加工质量的影响。

由于飞切加工为“复写”式加工,工件与刀具之间的位移变化会直接反映到工件表面上,而竖直方向上的位移变化对工件表面质量的影响尤为明显。因此,主要考察光学晶体的 z 向切削力。

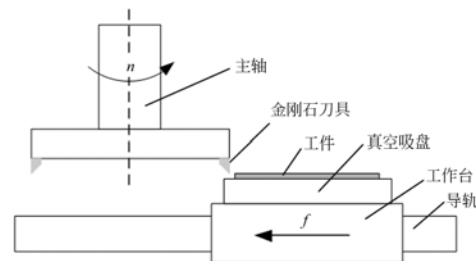


图 1 飞切加工原理

Fig. 1 processing principle of flycutting machining

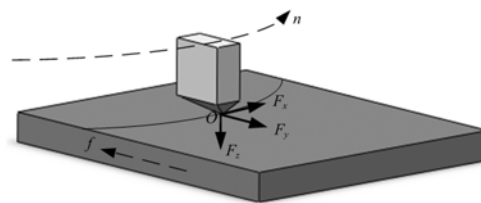


图 2 切削力模型

Fig. 2 Model of cutting force

采用响应曲面法(RSM)对光学晶体的 z 向切削力进行建模。响应曲面法是数学方法和统计技术的集合,用于分析多个变量对单个或多个响

应的影响,目的是建模或者优化该响应^[10]。该方法在 20 世纪 50 年代初由 Box 和 Wilson 引入^[11],响应曲面法使用定量的数据,由相应的实验设计来确定并求解多变量方程^[12]。

响应曲面法已在工业中得到广泛使用,研究人员已经应用响应面法来进行建模和制造工艺参数的分析。Ramesh S^[13]等利用响应面法在钛合金的切削加工中建立了粗糙度的预测模型,胡俊峰^[14]等运用响应面法对一种新型微操作平台进行了多目标优化设计。运用响应曲面法可关联不同的加工参数在光学晶体的加工中对切削力更高级的以及相互的影响。

在许多工程领域,响应 y 和一组可控变量 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 之间存在一定关系。在一些系统中, y 和 x 值之间的关系性质可能是已知的,可建立如下方程:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \epsilon, \quad (1)$$

式中: ϵ 代表在响应 y 中的误差和噪声。将期望的响应表示为 $E(y) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \eta$, 则:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2)$$

称为响应曲面。

在大多数响应曲面问题中,响应和自变量的关系是未知的,所以,响应曲面法的第一步是找到合适的近似函数来反映响应和自变量之间的真实函数关系,在响应曲面法中通常采用二阶模型:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon, \quad (3)$$

式中: β 系数通过最小二乘法得到。因此,光学晶体飞切加工的切削力模型为:

$$F = \beta_0 + \beta_1 n + \beta_2 f + \beta_3 d + \beta_{11} n^2 + \beta_{22} f^2 + \beta_{33} d^2 + \beta_{12} nf + \beta_{13} nd + \beta_{23} fd + \epsilon, \quad (4)$$

式中: F 为 z 向切削力, n 为主轴转速, f 为工件进给速度, d 为切削深度。

3 切削力测试实验

采用超精密飞切机床对 200 mm × 200 mm 的光学晶体进行飞切加工,并运用瑞士 Kistler 9255C 测力仪对切削力进行测试,如图 3 所示。测力仪底座尺寸为 260 mm × 260 mm, x 和 y 方向灵敏度为 -8 pC/N, z 向灵敏度为 -3.9 pC/N, x 和 y 方向测力达 30 kN, z 向达 60 kN,完全满

足测量要求,整套测量系统由测力底座,电荷放大器、数据采集器和 PC 组成。

实验参数使用田口方法进行设计,该方法可用少量的实验次数分析多个因素对响应的影响^[15-16]。实验对主轴转速 n 、工件进给速度 f 和切削深度 d 对切削力的影响进行研究,每个因素分 3 个水平进行实验,如表 1 所示。这 3 个主要列因素具有 6 个自由度,3 个二阶相互作用的自由度为 12,总自由度为 18。按照田口实验设计方法,选择的正交阵列的总自由度必须大于或等于实验所需的总自由度,因此选择 L27(3¹³) 正交表,共 27 行,与实验次数对应,具有 13 列,可容纳多达 13 个变量,具有 26 个自由度(DOF),满足设计要求。实验设计的 L27 正交表及实验结果如表 2 所示。

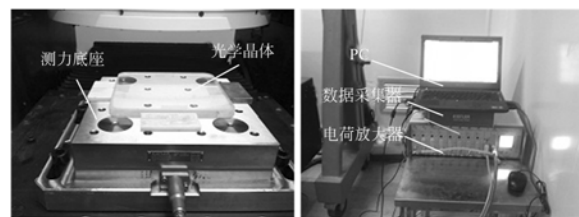


图 3 切削力测试方案

Fig. 3 Test method of cutting force

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

因素	水平		
	1	2	3
主轴转速 n/rpm	120	240	360
进给速度 $f/\mu\text{ms}^{-1}$	60	120	180
切削深度 $d/\mu\text{m}$	10	30	50

4 切削力建模与分析

在 minitab 软件中,采用表 2 数据,运用式(4)的模型对光学晶体 z 向切削力 F_z 进行建模,并对模型进行优化,得到切削力模型为:

$$F_z = 0.672 - 0.00704n + 0.00532f + 0.0546d + 0.000014n^2 - 0.00423d^2 - 0.00002nf - 0.000069nd + 0.000181fd. \quad (5)$$

运用方差分析(ANOVA)技术对模型的正确性进行了分析,开发模型 F 比的计算值没有超过 F 比

的标准表列值,置信期望水平为 95%。由表 3 可知本模型明显满足 95%的置信水平。

此外,还运用 R^2 值对模型的正确性进行分析。模型的 R^2 值为 98.58%,非常接近于 1,显示出模型的正确性;模型的调整 R^2 值为 97.94%,与 R^2 值非常接近,说明模型的非常可靠;模型的预测 R^2 值为 96.81%,说明模型具有很好的预测能力。

最后,还使用残差分析方法对该模型进行验证,模型的残差如图 4 所示,从图 4(a)和(c)中可以看到,模型的残差落在一条直线上,呈正态分布,表明误差分布正常。图 4(b)显示拟合值的残差无明显分布规律,等方性保持良好。图 4(d)显示 27 次实验的残差分布在正负 2 个方向,没有明显的规律,说明模型是正确可靠的。

表 3 方差分析结果

Tab. 3 Result of ANOVA

项目	自由度	平方和	均方值	F 值	P 值
模型	8	18.297 2	2.2871 5	155.78	0.000
线性	3	16.743 4	5.5811 3	380.14	0.000
A-主轴转速(n)	1	5.968 9	5.968 86	406.54	0.000
B-进给速度(f)	1	2.315 3	2.315 34	157.70	0.000
C-切削深度(d)	1	8.459 2	8.459 21	576.16	0.000
平方	2	0.414 2	0.207 12	14.11	0.000
AA	1	0.242 6	0.242 58	16.52	0.001
CC	1	0.171 7	0.171 66	11.69	0.003
交互影响	3	1.135 9	0.379 85	25.87	0.000
AB	1	0.245 0	0.244 96	16.68	0.001
AC	1	0.331 3	0.331 34	22.57	0.000
BC	1	0.563 2	0.563 25	38.36	0.000
误差	18	0.264 3	0.014 68		
总计	26	18.561 5			

表 2 实验分组及结果

Tab. 2 Experimental groups and results

序号	主轴转速	进给速度	切削深度	主轴转速	进给速度	切削深度	切削力
	n/rpm	$f/(\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$d/\mu\text{m}$	n/rpm	$f/(\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$d/\mu\text{m}$	F_z/N
1	1	1	1	120	60	10	0.637 6
2	1	1	2	120	60	30	1.739 2
3	1	1	3	120	60	50	1.930 7
4	1	2	1	120	120	10	0.978 5
5	1	2	2	120	120	30	1.975 3
6	1	2	3	120	120	50	2.694
7	1	3	1	120	180	10	1.178 7
8	1	3	2	120	180	30	2.752 7
9	1	3	3	120	180	50	3.449 2
10	2	1	1	240	60	10	0.318 4
11	2	1	2	240	60	30	0.992 2
12	2	1	3	240	60	50	1.134
13	2	2	1	240	120	10	0.494 7
14	2	2	2	240	120	30	1.131 5
15	2	2	3	240	120	50	1.804 2
16	2	3	1	240	180	10	0.608 5
17	2	3	2	240	180	30	1.601 3
18	2	3	3	240	180	50	2.258 8
19	3	1	1	360	60	10	0.155 6
20	3	1	2	360	60	30	0.680 2
21	3	1	3	360	60	50	0.809 8
22	3	2	1	360	120	10	0.216
23	3	2	2	360	120	30	0.699 8
24	3	2	3	360	120	50	1.405
25	3	3	1	360	180	10	0.284 8
26	3	3	2	360	180	30	0.992 7
27	3	3	3	360	180	50	1.726 7

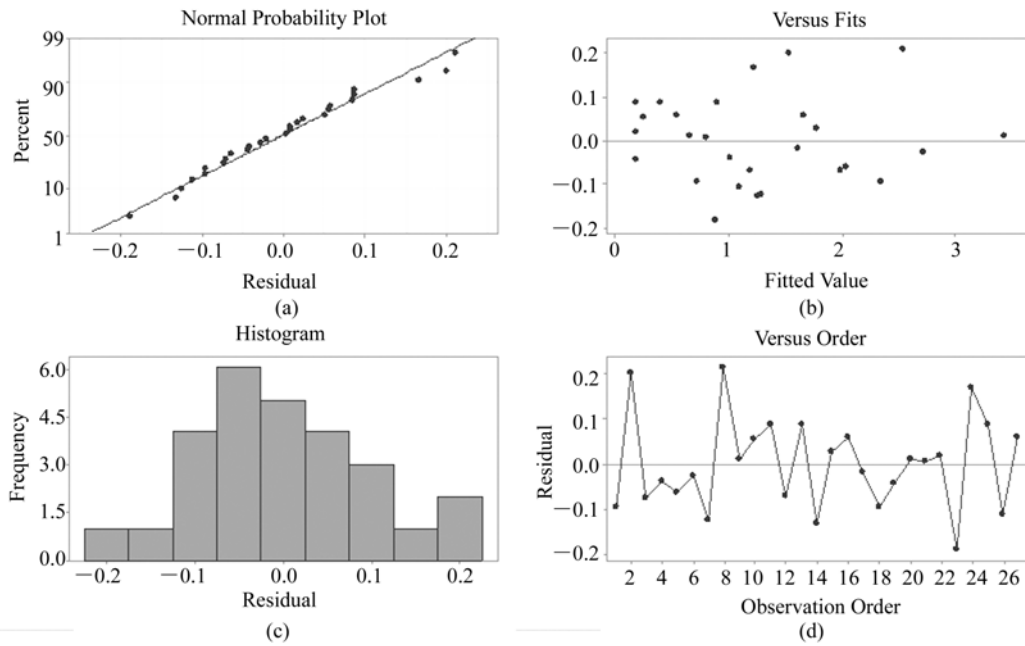
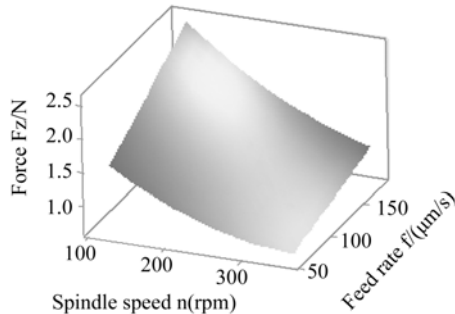


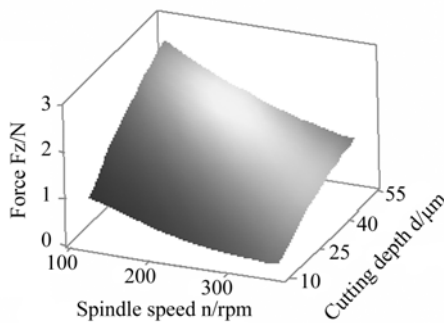
图 4 模型残差图
Fig. 4 Residual map of model

5 结果与讨论

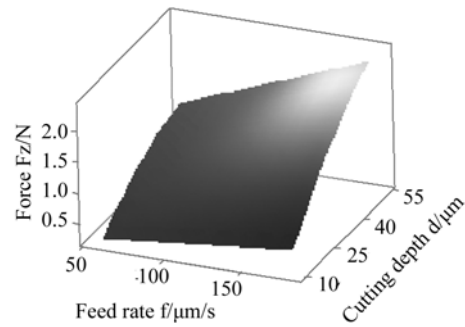
图 5 为切削力的 3D 响应曲面,其通过保持一个加工参数不变,改变另外 2 个加工参数获得。



(a) 主轴转速和进给速度对切削力的影响
(a) Spindle speed vs. feed rate for cutting force



(b) 主轴转速和切削深度对切削力的影响
(b) Spindle speed vs. cutting depth for cutting force



(c) 进给速度和切削深度对切削力的影响
(c) Feed rate vs. cutting depth for cutting force

图 5 切削力的响应曲面图

Fig. 5 Surface graphs for cutting force

从图中可以看出,切削力随着进给速度、切削深度的增大而增大,随着主轴转速的增大而减小,主轴转速和切削深度对切削力的影响大于进给速度,主轴转速的影响程度几乎与切削深度一致。

图 6 所示为切削力测试的时域图,可以看到在切削过程中明显的冲击现象,工件被切削上的时间非常短,如图 6(a),在转速较低的工况下,两次切削之间的空载力比较平稳,而在转速较高时,如图 6(b),两次切削之间出现明显的负向力。分析发现,在切削过程中,由于刀架安装在刀盘外侧,主轴转动会使刀架产生兜风现象,在刀盘与工件之间产生明显的气流,主轴转速越高,气流速度

越快,由于主轴采用气浮轴承支承,因此在主轴转动较快时,由于刀盘下部的气流作用,主轴会受到一个向上的浮力作用,使得实际切削深度小于名义切削深度,因此主轴转速对切削力的影响较大。在设计中,应考虑对刀盘结构进行改进,减小或消除主轴转动中引起的气流,使切削力更可控。

结合表 3 的方差分析结果,可以得到如下结论:切削深度对切削力的影响最大,主轴转速次之,进给速度影响最小。所以在实际加工过程中,可适当提高工件的进给速度,以提高加工效率。

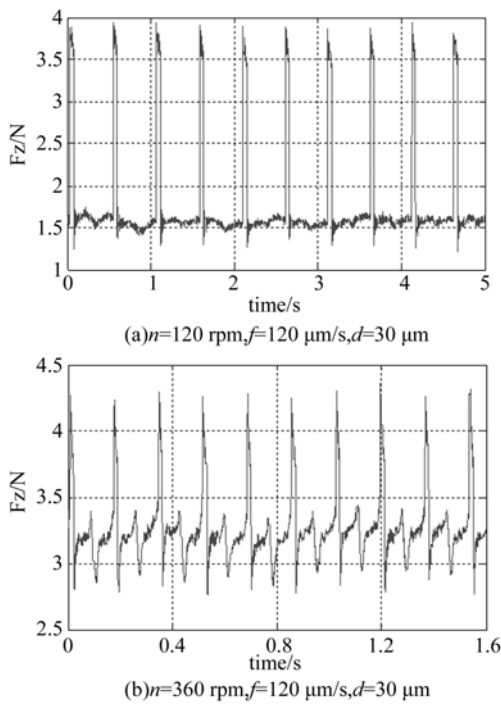


图 6 切削力时域图

Fig. 6 Time-domain plot of cutting depth

6 实验验证

为验证切削力模型的可靠性和预测能力,对 3 个加工参数随机取值,进行切削力测试实验,同时运用式(5)所示的切削力模型对切削力进行预测,实验参数如表 4 所示。得到实验的测量值与预测值如图 7 所示。从图中可以看到两者良好的

匹配性,预测精度达 2.5%,说明本文所得的切削力模型具有良好的预测能力。

表 4 验证实验参数

Tab. 4 Randomly selected conditions for verification tests

实验编号	主轴转速 n/rpm	进给速度 $f/(\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	切削深度 $d/\mu\text{m}$
1	180	180	20
2	300	120	20
3	300	60	40

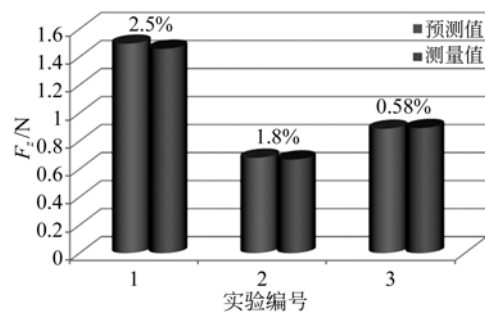


图 7 验证实验结果

Fig. 7 Result of verification tests

7 结论

超精密飞刀切削加工是一种间断性切削方式,本文通过对光学晶体的切削力进行测试,采用响应曲面法建立了切削力的预测模型,具有良好的预测能力,预测精度达 2.5%。同时通过分析发现:切削力随着主轴转速的增大而减小,随着进给速度和切削深度的增大而增大,切削深度对切削力的影响最大,主轴转速次之,进给速度影响最小。因此,在精加工过程中,应尽量增大主轴转速,减小切削深度,进给速度在小于 $180 \mu\text{m}/\text{s}$ 内可根据加工效率进行调整。此外,刀架的兜风现象也是影响切削力的一个因素,在设计机床时,可考虑改进刀架安装方式,减小或消除刀架的兜风现象,使机床的切削力更可控,从而保证加工质量。

参考文献:

- [1] PHILIPPE L, CHRISTIAN C, PIERRE D, *et al.*. Using a design of experiment method to improve KDP crystal machining process [J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 1998, 3492: 814-820.
- [2] KAISHI S K. Single point diamond turning of KDP inorganic non-linear optical crystal for laser fusion [J]. *Journal of Japan Society Precision Engineering*, 1998, 64(10): 1181-1185.
- [3] 张文生, 张飞虎, 董申. 光学脆性材料的金刚石切削加工[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(2): 139-143.
- ZHANG W SH, ZHANG F H, DONG SH. Diamond cutting of optical brittle materials[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2): 139-143.
- [4] 梁迎春, 陈国达, 孙雅洲, 等. 超精密机床研究现状与展望[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2014, 46(5): 28-39.
- LIANG Y CH, CHEN G D, SUN Y ZH, *et al.*. Research status and prospect for Ultra-precision machine tool [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(5):28-39. (In Chinese)
- [5] CHEN M J, LI M Q, CHENG J, *et al.*. Study on characteristic parameters influencing laser-induced damage threshold of KH₂PO₄ crystal surface machined by single point diamond turning [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(11): 113103.
- [6] LI M Q, CHEN M J, AN C H, *et al.*. Mechanism of micro-waviness induced KH₂PO₄ crystal laser damage and corresponding vibration source [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(5): 050301.
- [7] 赵岩, 梁迎春, 白清顺, 等. 微细加工中的微型铣床、微刀具磨损及切削力的实验研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 894-592.
- ZHAO Y, LIANG Y C, BAI Q SH, *et al.*. Micro-milling machine tool, micro-tool wear and cutting forces in micro-machining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 894-592.
- [8] 周明, 邹莱. 金刚石切削黑色金属时刀具磨损机理的摩擦磨损试验[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1786-1794.
- ZHOU M, ZOU L. Tool wear mechanism of diamond cutting of ferrous metals in frictional wear experiment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1786-1794.
- [9] 刘勇, 尹自强, 李圣怡, 等. 微槽结构单点金刚石飞切加工的切削力建模[J]. *国防科技大学学报*, 2014, 36(2): 175-180.
- LIU Y, Y Z Q, L SH Y, *et al.*. Cutting force model for fabrication of micro-grooves by single point diamond flycutting[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(2): 175-180. (In Chinese)
- [10] MONTGOMERY D C. *Design and Analysis of Experiments*[M]. New York:John Wiley, 2001.
- [11] BOX G E P, WILSON K B. On the experimental attainment of optimum conditions[J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series B-statistical Methodology*, 1951, 13(1):1-45.
- [12] KHURI A I, Mukhopadhyay S. Response surface methodology [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2010, 2(2): 128-149.
- [13] RAMESH S, KARUNAMOORTHY L, PALANIKUMAR K. Measurement and analysis of surface roughness in turning of aerospace titanium alloy (gr5) [J]. *Measurement*, 2012, 45(5): 1266-1276.
- [14] 胡俊峰, 徐贵阳, 郝亚洲. 基于响应面法的微操作平台多目标优化[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4): 1096-1104.
- HU J F, XU G Y, HE Y ZH. Multi-objective optimization of micro-manipulation stage based on response surface method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1096-1104.
- [15] 李昇平, 张思君. 基于关联度分析的静态和动态稳健性设计[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(5): 130-137.
- LI SH P, ZHANG EN J. Static and dynamic robust design based on grey relational analysis[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(5): 130-137.
- [16] 丁日显, 郭成, 张缓缓, 等. 基于田口方法齿圈压板精冲模具参数优化[J]. *材料科学与工艺*, 2013, 21(1): 92-96.
- DING R X, GUO CH, ZHUANG Y Y, *et al.*. Optimization of parameters of fine-blanking die based on the Taguchi method[J]. *Materials Science & Technology*, 2013, 21(1): 92-96.

作者简介:



王振忠(1982—),男,山西太原人,博士,副教授,2009年于厦门大学获学士学位,中国工程物理研究院激光聚变研究中心联合培养博士生。同年进入厦门大学物理学博士后流动站工作,期间到日本秋田县立大学机械智能系统学科从事合作研究近一年。主要从事精密加工装备及工艺技术、微纳米加工与系统控制、超声复合加工技术方面的研究。Email: wangzhenzhong @ xmu.edu.cn