

文章编号 1004-924X(2013)04-0972-08

## 旋转超声磨削加工中影响磨具寿命的结构参数优化

荆君涛<sup>1,3</sup>, 刘运凤<sup>1,3\*</sup>, 李占杰<sup>2</sup>, 饶小双<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 154001;

2. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津市微纳制造技术工程中心, 天津 300072;

3. 航天科工哈尔滨风华有限公司, 黑龙江 哈尔滨 154001)

**摘要:** 为了提高陶瓷基零部件的旋转超声磨削加工精度, 降低磨具磨损造成的加工误差, 建立了超声振动磨具寿命与磨粒粒度、浓度、磨具内圆直径等结构参数间关系的数学模型, 对影响超声振动磨具寿命的结构参数进行了优化。首先, 基于响应曲面法, 建立了青铜基超声振动磨具二阶寿命模型, 通过 Box-Behnken 实验对超声振动磨具寿命模型进行了拟合。然后, 通过有效性和显著性检验, 验证了所建立的超声振动磨具寿命模型。最后, 通过拟合影响因子与超声振动磨具寿命关系的响应曲面和等高线, 分析了各因素对磨具寿命的交叉影响, 并优化了磨具的结构参数。结果表明: 当磨粒粒度为 D98.85、浓度为 77.36、磨具内圆直径为 5.34 mm 时, 去除体积为 9 600 mm<sup>3</sup>、致密度为 85% 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷材料后, 磨具磨损量只有 0.006 9 mm, 显示优化后超声振动磨具寿命可以达到旋转超声精密磨削加工要求。

**关键词:** 旋转超声磨削加工; 超声振动磨具; 磨具寿命; 响应曲面

**中图分类号:** TG74; TB559 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.0972

## Optimization of structure parameters affecting tool life in rotary ultrasonic grinding machining

JING Jun-tao<sup>1,3</sup>, LIU Yun-feng<sup>1,3\*</sup>, LI Zhan-jie<sup>2</sup>, RAO Xiao-shuang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 154001, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,

Centre of MicroNano Manufacturing Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Harbin Fenghua Co., Ltd., China Aerospace Science & Industry Corporation, Harbin 154001, China)

\* Corresponding author, E-mail: weishil264326@126.com

**Abstract:** This paper focused on improving machining precision and reducing the machining errors caused by tool wearing in a Rotary Ultrasonic Grinding Machining (RUGM). The relation model between the ultrasonic vibration tool life and the grit sizes, grit concentration and the inner circle radius of a tool was established, and the parameters affecting ultrasonic vibration tool life were optimized. First, the second order model of ultrasonic vibration tool life was established for a bronze-bonded ultrasonic vibrating tool with Response Surface Methodology (RSM), and the model was fitted based on Box - Behnken experiments. Then the ultrasonic vibration tool life model was checked by effectiveness

**收稿日期:** 2012-11-09; **修订日期:** 2012-12-28.

**基金项目:** 科技部“高档数控机床与基础制造装备”重大专项资助项目 (No. 2010ZX04014-051); “十二五”航天支撑技术预研项目 (No. 61801060103)

and significance tests. Finally, the cross-fertilization between the various influence factors and the tool life was analyzed through fitting the response surface and the contour between ultrasonic vibration tool life and factors, and the ultrasonic vibration tool parameters were optimized. The results indicate that the wear capacity of ultrasonic vibration tool is only 0.006 9 mm, after removing 9 600 mm<sup>3</sup> for Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics materials with density of 85%, when the grit size is D98. 85, grit concentration is 77.36, and the inner circle radius of the tool is 5.34 mm. It satisfies the finish machining requirements for RUGM.

**Key words:** Rotary Ultrasonic Grinding Machining(RUGM); ultrasonic vibration tool; tool life; Response Surface Methodology (RSM)

## 1 引言

磨具寿命是评价超声振动磨具性能及旋转超声磨削加工技术水平的一个重要指标。超声振动磨具寿命与加工过程中的磨具磨损量直接相关,在相同加工条件下,磨具磨损量越大,磨具寿命越短<sup>[1]</sup>。超声振动磨具寿命直接影响加工表面的粗糙度和加工效率,同时,磨具磨损将增大零部件加工误差,影响加工精度<sup>[2-3]</sup>。在旋转超声磨削加工中,机床精度、振幅补偿误差、磨具磨损等都会影响加工精度,但磨具磨损对加工精度的影响最为显著。为了提高零部件加工精度,需提高超声振动磨具寿命,降低磨具磨损造成的加工误差,而超声振动磨具结构参数设计是否合理是影响磨具寿命的主要因素<sup>[4]</sup>。因此研究超声振动磨具技术,通过建立超声振动磨具寿命模型,对影响超声振动磨具寿命的结构参数进行优化,非常受行业内关注。如 Weilong Cong<sup>[5]</sup>等人采用磨具磨损质量评价磨具寿命,P. G. Petrukha<sup>[6]</sup>等人开展了SiC陶瓷旋转超声磨削加工磨具磨损的实验研究,用磨具磨损体积与去除材料体积之比来衡量磨具寿命与材料去除率间关系。不过,至今尚未有建立旋转超声磨削加工过程中磨具寿命模型的相关文献报道,目前普通磨具寿命模型研究多采用泰勒公式,但是这种方法主要研究磨具寿命与转速之间关系,考虑的因素较少,对超声振动磨具寿命研究并不适合<sup>[7]</sup>。

考虑磨具寿命受到多重结构参数(如磨粒粒度、浓度、磨具内圆直径等)的影响,而曲面响应法是研究受多变量因素影响和响应的常用方法,故基于该方法来建立磨粒粒度、浓度、磨具内圆直径等多变量参数影响的响应曲面超声振动磨具寿命

的模型,不仅可以分析磨具参数间交互作用对磨具寿命的影响,还可以对影响超声振动磨具寿命的参数进行优化。因此,本文以青铜基超声振动磨具为对象,以磨具纵向磨损量作为磨具寿命评价指标,基于响应曲面法,建立了青铜基超声振动磨具寿命模型。通过设计拟合二阶模型的 Box-Behnken 实验,分析磨粒粒度、浓度、磨具内圆直径等结构参数对超声振动磨具寿命的影响,并对这些结构参数进行优化。本文的工作为提高旋转超声磨削加工精度和超声振动磨具设计水平奠定基础。

## 2 响应曲面法基本原理

响应曲面法(Response Surface Methodology, RSM)采用系统的方式进行实验并取得所希望的响应值和因数水平,以此来探究未知系统的响应输出和影响因数之间的数学模型,并通过数学模型达到优化或预测响应变量的目的,进而提高或改进过程的性能<sup>[8-12]</sup>。其基本思想是通过构造一个明确的多项式来表达隐式功能函数,用来寻找考虑了输入变量值的变异或者不确定之后的最佳响应值<sup>[9,11]</sup>。

若某一实验过程中含有  $k$  个影响因子  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ , 则建立输入与输出响应的函数关系如下<sup>[9]</sup>:

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \epsilon, \quad (1)$$

其中:  $f$  为真实响应函数,通常是未知的;  $\epsilon$  为系统误差,通常假设其均值为 0, 方差为  $\sigma^2$ 。如果输出响应满足以下关系<sup>[9]</sup>:

$$E(y) = E[f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)] + E(\epsilon) = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) = \eta, \quad (2)$$

则式(2)表示的曲面为响应曲面。在式(1)和

式(2)中,  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$  通常为自然变量。在大多数响应曲面方法问题中, 为方便研究变量, 通常将自然变量转化成规范变量  $x_1, x_2, \dots, x_k$ , 这些规范变量都没有量纲, 均值为 0, 具有标准方差。在规范变量的情况下, 规范响应曲面函数可写为<sup>[9]</sup>:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (3)$$

在多数响应曲面问题中, 响应与自变量之间的关系形式是未知的。因此, 建立响应曲面模型的第一步就是寻求响应与自变量集合之间真实函数关系的一个合适的逼近式。通常, 可用在自变量某一区域内的一个低阶多项式来逼近。如果系统有弯曲, 则必须用更高阶的多项式, 例如二阶模型:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon, (i < j) \quad (4)$$

其中:  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  为用最小二乘法估计的多项式系数;  $\epsilon$  为随机误差。

在自变量的整个空间上只用一个多项式模型来近似, 结果可能不太合理, 但是在一个相对小的区域内这种近似的效果可满足要求。

### 3 超声振动磨具寿命响应曲面模型

影响超声振动磨具寿命因素很多, 研究的因素越多, 系统越复杂, 实验量越大。因此本文只对影响磨具寿命的主要参数: 磨粒粒度  $D$ 、浓度  $n$  及磨具内圆直径  $d$  进行研究, 磨具结合剂类型为青铜基。对于铁基和陶瓷基超声振动磨具的寿命研究, 也可采用相同的方法。超声振动磨具寿命的响应曲面模型是一个受三因素影响的二次响应曲面模型。

根据公式(4), 三因素的二次响应曲面模型可以写成:

$$y(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2, \quad (5)$$

式中:  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$  为用最小二乘法估计的多项式系数;  $x_1, x_2, x_3$  表示影响因子的规范变量。

青铜基超声磨具寿命研究中, 磨具各参数值如表 1 所示。

表 1 磨具变量参数值

Tab. 1 Variable parameters of tools

变量名	参数值		
粒度	D64	D95	D126
浓度 $n$	75	100	125
内径 $d(\text{mm})$	3	5	7

用  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  分别表示磨粒粒度  $D$ 、浓度  $n$  及磨具内圆直径  $d$  的自然变量,  $\bar{\xi}_1, \bar{\xi}_2, \bar{\xi}_3$  分别表示 3 个自然变量的中心值,  $\Delta\xi_1, \Delta\xi_2, \Delta\xi_3$  为 3 个自然变量的变化步长。则从表 1 中可知:  $\bar{\xi}_1 = 95 \text{ mm}$ ,  $\bar{\xi}_2 = 100 \text{ mm}$ ,  $\bar{\xi}_3 = 5 \text{ mm}$ ,  $\Delta\xi_1 = 31 \text{ mm}$ ,  $\Delta\xi_2 = 25 \text{ mm}$ ,  $\Delta\xi_3 = 2 \text{ mm}$ 。根据式(6)对磨具寿命的影响因子进行编码, 则磨具寿命影响因素水平的编码如表 2 所示。

$$x_i = \frac{\xi_i - \bar{\xi}_i}{\Delta\xi_i}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (6)$$

表 2 磨具寿命影响因素水平编码

Tab. 2 Coding of influential factor levels for tool lifes

输入参数	编码	因素水平		
		-1	0	1
粒度	$x_1$	D64	D95	D126
浓度 $n$	$x_2$	75	100	125
内径 $d(\text{mm})$	$x_3$	3	5	7

经过自然变量规范化编码转换, 式(5)即为超声振动磨具寿命的二次响应曲面模型,  $y$  即为磨具寿命响应。此时, 式中的  $x_i (i=1, 2, 3)$  有 -1, 0, 1 3 个水平, 分别代表磨具寿命影响因子的高水平值、中心值和低水平值。

## 4 超声振动磨具寿命实验

### 4.1 响应曲面实验设计

二阶响应曲面的设计方法常用的有中心复合设计(CCD)和 Box-Behnken 设计(BBD)。其中, 中心复合设计又包括外切中心复合设计(CCC)、内切中心复合设计(CCI)和面心立方设计(CCF) 3 种设计方法<sup>[13]</sup>。考虑实验的复杂性和经济性, 实验采用 BBD 二阶响应曲面设计方法。3 个中心点的 BBD 响应曲面设计如表 3 所示, 表中响应  $y$  记录的是加工相同体积材料后, 超声振动磨具纵向长度的磨损量。

表 3 实验设计及结果

Tab. 3 Experimental design and results

序号	自然变量			规范变量			响应
	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	64	75	5	-1	-1	0	0.012
2	126	75	5	1	-1	0	0.032
3	64	125	5	-1	1	0	0.072
4	126	125	5	1	1	0	0.032
5	64	100	3	-1	0	-1	0.156
6	126	100	3	1	0	-1	0.027
7	64	100	7	-1	0	1	0.023
8	126	100	7	1	0	1	0.103
9	95	75	3	0	-1	-1	0.037
10	95	125	3	0	1	-1	0.076
11	95	75	7	0	-1	1	0.026
12	95	125	7	0	1	1	0.041
13	95	100	5	-0	0	0	0.028
14	95	100	5	0	0	0	0.032
15	95	100	5	0	0	0	0.023

4.2 实验设备及材料

实验采用 DMG Ultrasonic 70-5 linear 超声振动机床。本文主要针对结合剂类型为青铜基 (70%Cu,30%Zn) 的超声振动磨具进行寿命研究,磨具外圆直径为 10 mm,根据表 3,所采用磨具种类共 13 种,如图 1 所示,所有磨具由郑州磨料磨具磨削研究所制备(注:由于粒度 D95 不为磨粒标准粒度值,采用 D91 代替),超声振动频率约为 27 400~27 700 Hz,振幅为 7 $\mu$ m。实验所采用的材料为致密度 85% 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷。实验工艺参数:主轴转速为 5 000 r/min,进给速度为 600 mm/min,分层厚度为 0.1 mm,加工宽度为 5 mm,每组实验材料的去除体积大小为 80 mm $\times$



图 1 实验用超声振动磨具

Fig. 1 Ultrasonic vibration tools for experiments

20 mm $\times$ 6 mm,超声振动磨具纵向长度的磨损量由超声振动机床中的激光对刀仪测定。

5 超声振动磨具寿命响应曲面实验结果分析

将每组实验后磨具磨损量值记入表中,结果如表 3 所示。对表中实验得到的响应数据进行响应曲面建模与分析,并运用最小二乘法就可拟合出超声振动磨具寿命的二阶响应曲面模型。

利用最小二乘法获得的超声振动磨具磨损量与金刚石磨粒的粒度、浓度以及磨具内径的二阶响应曲面模型为:

$$y=0.028-8.625 \times 10^{-3} x_1+0.014 x_2-0.013 x_3-0.015 x_1 x_2+0.052 x_1 x_3-6 \times 10^{-3} x_2 x_3+0.021 x_1^2-0.011 x_2^2+0.029 x_3^2, \quad (7)$$

代入自然变量后,超声振动磨具二阶响应曲面模型为:

$$y=0.37759-6.66719 \times 10^{-3} \xi_1+6.67538 \times 10^{-3} \xi_2-0.14648 \xi_3-1.93548 \times 10^{-5} \xi_1 \xi_2+8.42742 \times 10^{-4} \xi_1 \xi_3-1.2 \times 10^{-4} \xi_2 \xi_3+2.16354 \times 10^{-5} \xi_1^2-1.8333 \times 10^{-5} \xi_2^2+7.19792 \times 10^{-3} \xi_3^2, \quad (8)$$

该磨具寿命模型的适用范围为:64 $\leq D \leq 126, 75 \leq n \leq 125, 3 \text{ mm} \leq d \leq 7 \text{ mm}$ 。

5.1 超声振动磨具二阶响应曲面模型检验

5.1.1 有效性和显著性检验

模型能否实现对实际响应的预测取决于模型建立的是否合适,因此必须对模型的有效性进行

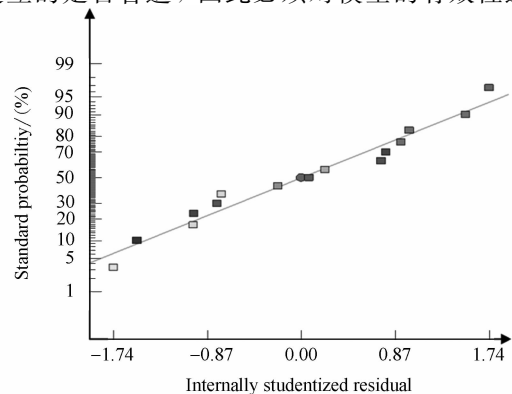


图 2 标准残差概率分布图

Fig. 2 Probability distribution of standard residual

检测。在 Design-Expert 中,可以根据残差的正态概率的分布是否接近一条直线来判定,如图 2 所示。从图中可以看出,标准残差的正态概率分布在一条直线上,充分表明了二阶模型的有效性。

模型的显著性反应了模型对实际响应的预测精度,因此需对超声振动磨具寿命二阶响应曲面模型进行方差分析,判断其显著性。设显著水平  $\alpha=0.05$ ,响应曲面模型的方差分析如表 4 所示。

表 4 响应曲面模型方差分析表

Tab. 4 Variance analysis of response surface model

方差来源	自由度	平方和	均方差	F 值	$F(\eta_1, \eta_2)$
回归因子	9	0.021	$2.299 \times 10^{-3}$	69.5	3.32
残余误差	5	$5.654 \times 10^{-4}$	$3.308 \times 10^{-5}$	—	—
总和	14	0.021	—	—	—

根据回归因子和残余误差的自由度查 F 分布表,得  $F(9,5)=3.32$ 。模型的残余误差趋近于零且  $F=69.5 \gg 3.32$ ,因此所拟合的超声振动磨具的二阶响应曲面模型显著度非常明显,即可以实现磨具寿命的精确预测。

5.1.2 模型中各项参数对响应影响的显著性检测

对二阶响应曲面法获得的超声振动磨具寿命回归方程的各项影响变量进行显著性检验,可以考察每个参数对超声振动磨具寿命作用的显著程度,从而对影响寿命的结构参数进行分析,以更好地对实验结果进行预测和控制。模型各参数的方差分析如表 5 所示。

表 5 二阶模型各项的方差分析

Tab. 5 Variance analysis of second order model

变异来源	P 值	变异来源	P 值	变异来源	P 值
$x_1$	0.008 2	$x_1 x_2$	0.003 4	$x_1^2$	0.000 9
$x_2$	0.000 9	$x_1 x_3$	0.000 1	$x_2^2$	0.012 3
$x_3$	0.001 4	$x_2 x_3$	0.091 3	$x_3^2$	0.000 2

P 值是衡量各项对响应的显著性的判断标准,可以依据 P 值的大小来判别各项的显著性: $P \leq 0.05$  的项对响应 y 影响显著, $P \leq 0.01$  的项对响应 y 的影响极显著, $P \geq 0.05$  的项对响应 y 影响不显著。从表 5 中可看出,模型中各参数对超声振动寿命影响的显著顺序为:①线性效应:磨粒

浓度( $x_2$ )>磨具内径( $x_3$ )>磨粒粒度( $x_1$ );②交叉效应: $x_1 x_3 > x_1 x_2 > x_2 x_3$ ;③二次效应: $x_3^2 > x_1^2 > x_2^2$ 。

5.1.3 模型的计算结果与真实结果的比较

根据模型方差分析可知,建立的超声振动磨具寿命二阶响应曲面模型具有较高显著性。运用该模型所得的计算结果和实验结果进行了比较,如图 3 所示。可以看出,二阶响应曲面模型的计算结果与真实实验结果几乎重合,最大绝对误差不超过 3%,进一步验证了模型有效性和显著性检验的结果。

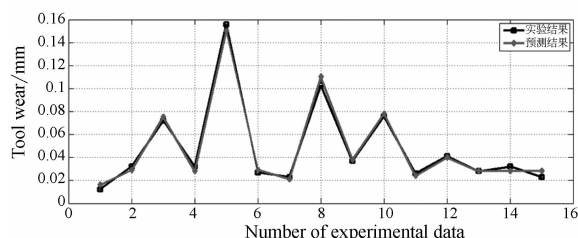
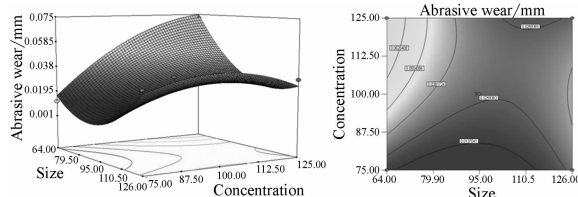


图 3 模型计算结果与实测数据的比较

Fig. 3 Comparison between calculated results and measured data of model

5.2 超声振动磨具结构参数对其寿命影响

由于超声振动磨具的寿命受到多重因素的影响,各因素间还存在着交叉作用,使得磨具参数的合理选择比较困难,因此,可以利用响应曲面法对超声振动磨具寿命模型进行拟合,得到各磨具参数对寿命的交叉影响规律,如图 4、图 5 和图 6 所示。

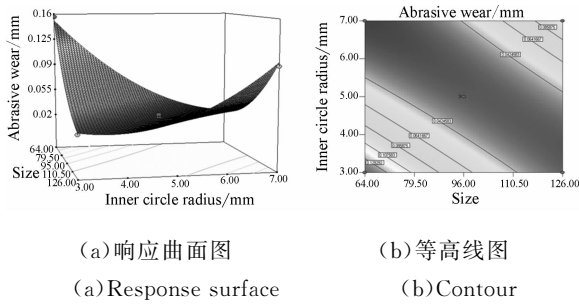


(a)响应曲面图 (b)等高线图  
(a)Response surface (b)Contour

图 4 磨粒粒度和浓度对磨具寿命影响

Fig. 4 Influence of size and concentration of grits on tool lifetimes

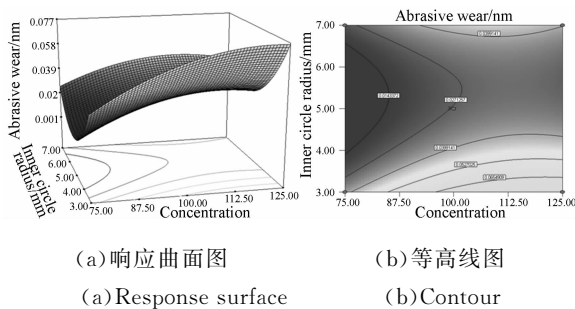
图 4、图 5 和图 6 为第三种磨具参数处于零水平时,其它两种参数对磨具磨损量影响的响应曲面和等高线。从图 4 中可以看出,超声振动磨具的磨损量随磨粒粒度的增加呈现先减小后增大



(a) 响应曲面图 (b) 等高线图  
(a) Response surface (b) Contour

图 5 磨粒粒度和磨具内径对磨具寿命影响

Fig. 5 Influence of size and inner circle radius on tool life



(a) 响应曲面图 (b) 等高线图  
(a) Response surface (b) Contour

图 6 磨粒浓度和磨具内径对磨具寿命影响

Fig. 6 Influence of concentration of grits and inner circle radius on tool life

的趋势,而随磨粒浓度的增加出现先增后减的趋势。磨粒粒度和浓度对超声振动磨具磨损的综合作用效果,使得其最小磨损量出现在磨粒粒度的零水平和浓度的低水平或高水平附近。

通过比较,图 5 中磨具内径和磨粒粒度对超声振动磨具磨损量的交叉作用较为复杂,二者交叉作用的效果明显。磨粒粒度和磨具内径的交叉作用,使得磨具磨损量沿着垂直于二者零水平连线的方向呈现出先减后增的变化趋势。因此,在超声振动磨削加工相同体积的  $Si_3N_4$  陶瓷材料后,超声振动磨具的最小磨损量出现在磨粒粒度和磨具内径的零水平位置附近。

图 6 中磨具磨损量的变化具有与图 4 中类似的趋势,磨具磨损随磨具内径增大呈现先减后增,随磨粒浓度呈现先增后减的变化趋势。因此,对于磨粒浓度和磨具内径的交叉作用而言,超声振动磨具磨损的最小值出现在磨具内径零水平和浓度的高水平或低水平附近位置。

### 5.3 超声振动磨具结构参数优化

根据结构参数对超声振动磨具磨损的影响和所建立的二阶模型,对超声振动磨具寿命进行优

化,优化结果如表 6 所示。由于所优化的磨具参数并非标准数值,采用此优化后的磨具参数进行寿命实验验证是难以实现的,因此采用与优化参数相近的标准参数值进行实验。实验所采用的磨具磨粒粒度为 D91,磨粒浓度为 75,磨具内圆直径为 5 mm,根据实验,磨具磨损量为 0.007 6 mm。理论优化值与实验值相比,误差量只有 9.2%,这与优化后磨具磨损量相近。

表 6 超声振动磨具寿命优化参数

Tab. 6 Optimization parameters of ultrasonic vibration tool life

变量名称	粒度	浓度/%	内径/mm	磨具磨损量/mm
数值	D98.85	77.36	5.34	0.0069

从表 6 中的优化结果可以看出,获得青铜基超声振动磨具寿命的最优组合为:磨具粒度和内径处于零水平,浓度处于低水平。优化结果与上述各参数对磨具磨损量的交叉作用分析结果一致,适中的磨粒粒度和磨具内径,可以弥补低浓度带来的有效磨削刃较少的不足,同时保证了容屑空间,避免了加工过程中磨屑对磨具的磨损作用,从而减少了超声振动磨具的磨损。青铜基超声振动磨具寿命的优化结果说明在合适的工艺参数条件下,适中的金刚石磨粒粒度和磨具内径以及较低的磨粒浓度,有助于提高青铜基超声振动磨具的使用寿命。

## 6 结 论

本文采用二阶响应曲面法,以磨具纵向磨损量作为磨具寿命评价指标,建立了青铜基超声振动磨具寿命与磨粒粒度、磨粒浓度和磨具内径的响应模型,通过有效性和显著性检验得出残余误差趋近于零,回归方程 F 分布值为 69.5,远大于 F 分布临界值 3.32,且标准残差概率分布在一条直线上,充分表明了模型具有较高的显著度。

本文进一步分析了磨粒粒度、磨粒浓度和磨具内径对超声振动磨具寿命的交叉影响,结果表明:当磨具内径一定时,磨粒粒度处于零水平、浓度处于低水平或高水平附近,磨具磨损量最小;当磨具浓度一定时,磨粒粒度和磨具内径处于零水

平位置附近,磨具磨损量最小;而当磨粒粒度一定时,磨具内径处于零水平和浓度处于高水平或低水平附近位置,磨具磨损量最小。

最后,优化了青铜基超声振动磨具结构参数,得出磨粒粒度为 D98.85、浓度为 77.36、磨具内圆直径为 5.34 mm 时,去除体积为 9 600 mm<sup>3</sup> 致

密度 85% 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷材料后,磨具磨损量最小值为 0.006 9 mm。结果表明:适中的金刚石磨粒粒度和磨具内径以及较低的磨粒浓度有助于提高超声振动磨具寿命,为超声振动磨具制造及旋转超声精密磨削加工中刀磨具参数选取提供了依据。

### 参考文献:

- [1] 刘运凤,荆君涛,李占杰. 旋转超声磨削加工中刀具结合剂类型与加工性能的关系[J]. 光学 精密工程, 2012,20(9): 2021-2028.  
LIU Y F, JING J T, LI ZH J. Relationship between bond patterns of tools and working performance in rotary ultrasonic grinding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 2021-2028. (in Chinese)
- [2] 葛英飞,徐九华,傅玉灿. 高速铣削 SiCp/Al 复合材料时聚晶金刚石刀具的磨损机理[J]. 光学 精密工程, 2011,19(12): 2908-2918.  
GE Y F, XU J H, FU Y C. Wear mechanisms of PCD tool in high-speed milling of SiCp/Al composis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2908-2918. (in Chinese)
- [3] 欧阳渺安. 超精密非球面镜面模具直轴磨削的研究[J]. 光学 精密工程, 2006,14(4): 545-552.  
OUYANG M A. Study of ultra-precision vertical grinding for aspheric lens mould [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 545-552. (in Chinese)
- [4] 修世超,蔡光起,李长河. 磨料磨具特性参数的选择技术及其发展构想[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2004,140(2):28-31.  
XIU SH C, CAI G Q, LI CH H. Selection technique of abrasive tool and grinding parameters [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2004, 140(2): 28-31. (in Chinese)
- [5] CONG W L, FENG Q, PEI Z J, *et al.*. Comparison of superabrasive tools in rotary ultrasonic machining of stainless steel [C]. *ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Erie, Pennsylvania, USA* : MSEC, 2010,1:113-119.
- [6] PETRUKHA P G. Ultrasonic diamond drilling of deep holes in brittle materials [J]. *Journal of Russian Engineering*, 1970,50:70-74.
- [7] ARSECULARATNE J A, ZHANG L C, MON-TROSS C. Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN and PCD cutting tool[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006,46(5):482-491.
- [8] 王晓琴,艾星,赵军,等. 涂层刀具铣削 Ti6Al4V 刀具寿命及切削参数的优化[J]. 武汉理工大学学报, 2008,30(10):109-112.  
WANG X Q, AI X, ZHAO J, *et al.*. Research on tool life in Ti6Al4V milling with coated carbides and cutting parameter optimization [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 30(10): 109-112. (in Chinese)
- [9] DOUGLAS C M. 实验设计与分析[M]. 第 6 版. 北京:人民邮电出版社,2009.  
DOUGLAS C M. *Design and Analysis of Experiments*[M]. sixth ed, Beijing: Posts Telecom Press, 2009. (in Chinese)
- [10] 张焜州,明伟伟,安庆龙,等. 响应曲面法在表面粗糙度预测模型及参数优化中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2010,44(4):447-475.  
ZHANG H ZH, MING W W, AN Q L, *et al.*. Application of response surface methodology in surface roughness prediction model and parameter optimization [J]. *Journal of Shanghaijiaotong University*, 2010, 44(4): 447-475. (in Chinese)
- [11] 梁永收,史耀耀,任军学,等. 基于响应曲面法的 GH4169 铣削力预测模型研究[J]. 机械科学与技术, 2010,29(11):1547-1552.  
LIANG Y SH, SHI Y Y, REN J X, *et al.*. Prediction model of GH4169 milling force by response surface methodology [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2010, 29(11): 1547-1552. (in Chinese)
- [12] 石文天,王西彬,刘玉德,等. 基于响应曲面法的微

细铣削表面粗糙度预报模型与实验研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(20): 2399-2402.

SHI W T, WANG X B, LIU Y D, *et al.*. A prediction model and experimental study of surface roughness in Micro-milling based on RSM [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(20): 2399-2402. (in Chinese)

[13] 张志红, 何桢, 郭伟. 在响应曲面法中三类中心复

合设计的比较研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2007, (1): 87-91.

ZHANG ZH W, HE ZH, GUO W. A comparative study of three central composite designs in response surface methodology [J]. *Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering*, 2007, (1): 87-91. (in Chinese)

#### 作者简介:



**荆君涛**(1979—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,高级工程师,2009年于哈尔滨工程大学获得硕士学位,主要从事硬脆材料精密加工及加工表面完整性评价。E-mail: jjt76732@hotmail.com



**李占杰**(1977—),男,河北隆尧人,博士研究生,2007年于天津大学机械学院获得硕士学位,主要从事光学零部件超精密加工、超声振动辅助金刚石切削钢铁材料。E-mail: mtydhghd@126.com



**饶小双**(1987—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事工程陶瓷材料精密加工表面完整性研究。E-mail: rxs\_cug@126.com

#### 通讯作者:



**刘运凤**(1973—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,研究员,2005年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事硬脆材料高效精密加工及超声振动刀具技术研究。E-mail: weishi1264326@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)