

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.08.011

# 氧化锆陶瓷车削刀具几何参数的多目标优化

马廉洁<sup>1,2</sup>, 左宇辰<sup>1</sup>, 周云光<sup>2</sup>, 付海玲<sup>2</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 通过氧化锆车削试验测得切削力和刀具磨损量,以工件材料去除量与刀具磨损量的比值作为刀具利用率的量化指标.采用粒子群算法改进BP神经网络,并以此对单因素试验值进行训练预测.采用最小二乘拟合,建立刀具利用率和切削力关于各刀具几何参数的一元模型,以相关系数检验模型的可靠性.基于一元模型,分别提出了刀具利用率和切削力关于刀具几何参数的多元模型.利用粒子群算法结合正交试验值对多元模型进行优化求解,并通过验证试验证明了多元模型具有较高的精度.将多元模型作为目标函数,以刀具利用率最大和切削力最小为优化目标,基于粒子群算法进行了刀具几何参数的多目标优化,验证试验结果表明优化得到的刀具几何参数是合理的.

**关 键 词:** 氧化锆陶瓷;刀具几何参数;数值拟合;多目标优化;车削

**中图分类号:** TH 161      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)08-1129-06

## Multi-objective Optimization of Tool Geometry Parameters in Turning Zirconia Ceramics

MA Lian-jie<sup>1,2</sup>, ZUO Yu-chen<sup>1</sup>, ZHOU Yun-guang<sup>2</sup>, FU Hai-ling<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China.  
Corresponding author: MA Lian-jie, E-mail: bcmlj1025@163.com)

**Abstract:** The cutting force and tool wear were measured through the zirconia turning experiment, and the ratio of workpiece material removal to tool wear was as a quantitative index of tool utilization. The single-factor experimental values were trained and predicted by BP neural network that was improved by particle swarm optimization (PSO). The one-dimensional models describing the relationship of tool utilization/cutting force and the geometric parameters of each tool were established by least-squares fitting, and the reliability of the models was tested by the correlation coefficient. The multivariate models based on the one-dimensional models are proposed too. The multivariate models were solved by PSO combined with orthogonal experimental values, and was proved to be more accurate through experiments. Taking the multivariate models as the objective function and the maximum tool utilization/minimum cutting force as the optimization goals, the tool geometry parameters were optimized by PSO, and the experiments show that the optimized tool geometry parameters are reasonable.

**Key words:** zirconia ceramic; tool geometry parameters; numerical fitting; multi-objective optimization; turning

氧化锆工程陶瓷化学性能稳定,耐高温,耐腐蚀,在国防、精密仪器、生物医学等领域得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>;但是由于其材料组织不均匀,具有明显的各向异性,表面及内部会有许多随机分布的缺陷,如孔隙、裂纹等<sup>[4]</sup>.陶瓷材料随机分布的缺陷是影响切削过程的重要因素之一,阻碍了直接获取切削力、材料去除以及刀具磨损与刀具几何参数之间的解析关系.切削力和刀具磨损程度是影响零件加工质量的重要因素,目前对硬脆材料的研究只是停留在其可加工性上,对影响其切削力和刀具磨损的刀

具几何参数的研究报道较少. 因此,研究刀具几何参数对切削力和刀具磨损的影响,选择合适的刀具几何参数,对实现工程陶瓷的高精度高效加工以及充分发挥车削系统的加工能力具有重要意义<sup>[5-8]</sup>.

BP(back propagation)神经网络具有自学习和自适应能力、非线性映射能力和良好的泛化和容错能力,广泛应用于函数预测、数据分类等方面<sup>[9-10]</sup>,但收敛速度慢,易陷入局部收敛,网络的预测能力和训练能力不稳定. 粒子群优化(particle swarm optimization,PSO)算法具有结构简单、易实现和收敛速度快等优点,在离散化、非线性的工程实际问题中得到广泛应用<sup>[11-12]</sup>. 利用 PSO 算法改进 BP 算法,使其具有稳定性高、泛化能力强及避免陷入局部收敛的优点,得到的结果更加精确.

本文以工件材料去除量与刀具磨损量的比值作为刀具利用率的量化指标,采用不同几何参数的 YG6 刀具进行氧化锆陶瓷车削实验,根据单因素试验值建立切削力和刀具利用率关于刀具几何参数的一元模型,从而分析整合出多元模型,并根据正交试验值进行优化求解,最终得到一组优化后的刀具几何参数,并通过实验对优化后的刀具几何参数加以验证.

# 1 实 验

在 CAK5085D 型数控车床上进行干式外圆车削实验,工件为直径 22 mm 的氧化锆陶瓷棒料,密度为 6.0 ~ 6.1 g/cm<sup>3</sup>,抗拉强度 232.9 MPa,热导率 2.5 W/(m·K),其化学组成:  $w(\text{ZrO}_2) < 96\%$ ,  $w(\text{Y}_2\text{O}_3) > 4\%$ ,  $w(\text{HfO}_2) > 1\%$ ,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3) < 1\%$ ,  $w(\text{SiO}_2) < 0.02\%$ . 选用 YG6 硬质合金车刀,切削速度 55 m/min,进给量 0.06 mm/r,切削深度 0.03 mm. 以刀具的前角  $\gamma_0$ 、后角  $\alpha_0$ 、刀尖圆弧半径  $r$  为试验变量,分别进行单因素试验(表 1)和  $L_{16}(4^3)$  正交试验(表 2 和表 3),重复试验两次. 刀具体积磨损量

表 1 单因素试验条件			
Table 1 Experimental conditions of single factor test			
实验编号	$\gamma_0/(^\circ)$	$\alpha_0/(^\circ)$	$r/\text{mm}$
1 ~ 8	-24, -19, -14, -9, -4, 1, 6, 11	19	0.5
9 ~ 16	-9	7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28	0.5
17 ~ 24	-9	19	0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2

$V_{\text{ip}}$  用 DSX110 型 3D 激光共聚焦显微镜测量刀具磨损前后的变化量来表示. 采用瑞士 Kistler 公司生产的六分量切削力测试系统对车削力  $F$  进行测量.

表 2 正交试验因素水平			
Table 2 The factors and levels of orthogonal test			
水平	因素		
	$\gamma_0$	$\alpha_0$	$r$
1	-14	0	0.5
2	-7	6	0.7
3	0	12	0.9
4	7	18	1.1

表 3 正交试验条件			
Table 3 Experimental conditions of orthogonal test			
组号	$\gamma_0/(^\circ)$	$\alpha_0/(^\circ)$	$r/\text{mm}$
1 ~ 4	-14	0, 6, 12, 18	0.5, 0.7, 0.9, 1.1
5 ~ 8	-7	0, 6, 12, 18	0.7, 0.5, 1.1, 0.9
9 ~ 12	0	0, 6, 12, 18	0.9, 1.1, 0.5, 0.7
13 ~ 16	7	0, 6, 12, 18	1.1, 0.9, 0.7, 0.5

# 2 一元模型的建立

## 2.1 刀具利用率

从高效率、低成本的实际生产要求出发,以工件材料去除量  $V$  与刀具磨损量  $V_{\text{ip}}$  的比值作为刀具利用率  $\psi$  的量化指标. 刀具利用率较高,即产生单位体积的刀具磨损量时,可去除的材料较多,表明刀具的性能和材料的可加工性优良.

$$V = \pi \left[ \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_2}{2} \right)^2 \right] l.$$

(1)

式中:  $d_1$  和  $d_2$  为车削前和车削后工件的直径;  $l$  为车削长度.

$$\psi = V/V_{\text{ip}}.$$

(2)

## 2.2 PSO 算法改进的 BP 神经网络

由于 BP 神经网络的权值和阈值的初始化是随机或者人为按照经验设置,得到结果之前无法判断参数设置得好坏,所以容易引起局部收敛. 本文利用 PSO 算法优化 BP 的权值和阈值,再将优化后的权值和阈值赋予 BP 神经网络,使其能够找到全局极值. PSO-BP 算法流程如图 1 所示.

## 2.3 刀具几何参数对刀具利用率的影响

图 2 为刀具几何参数对刀具利用率的影响. 以刀具前角  $\gamma_0$  为例,通过考查单因素试验值和 PSO-BP 神经网络预测值的变化趋势,提出一元假设模型如式(3)所示,利用最小二乘拟合,解得模型如式(4)所示. 通过式(5)检验模型拟合的优劣,其相

关系数  $R^2$  为 0.964 2, 表明模型具有较高可靠度。

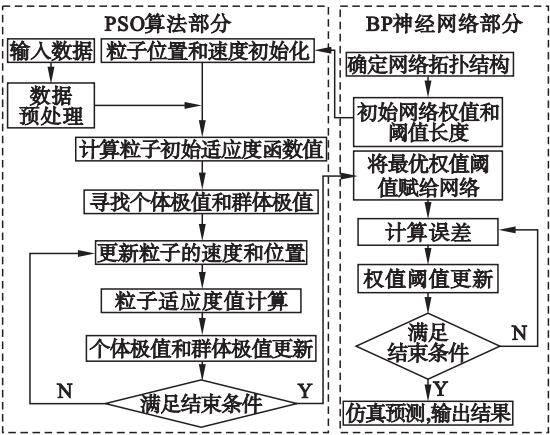


图 1 PSO 优化 BP 算法流程图  
Fig. 1 Flow chart of BP algorithm optimized by PSO

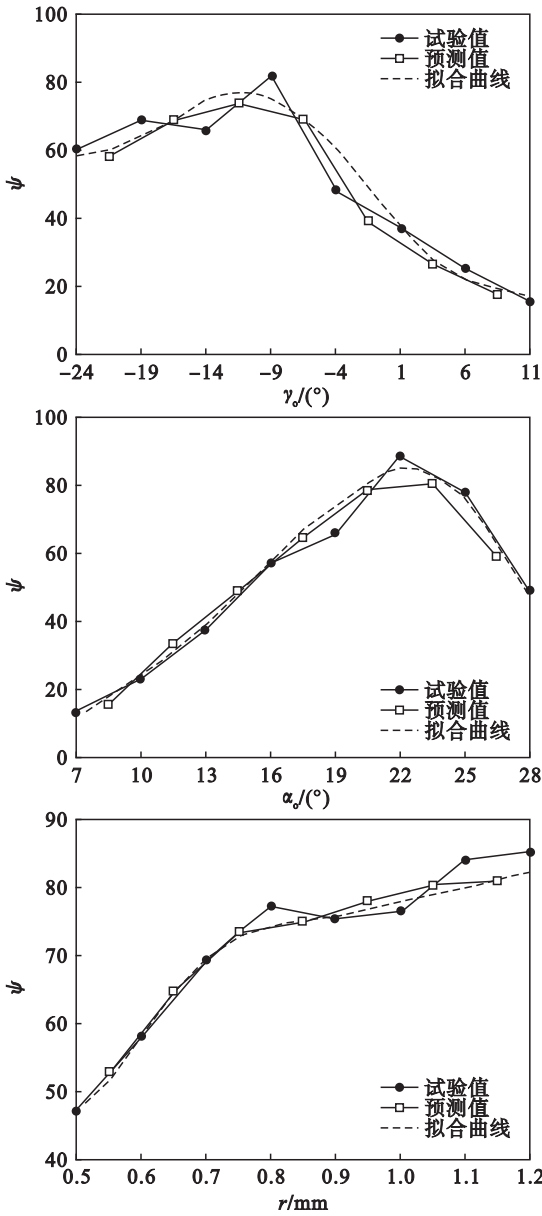


图 2 刀具几何参数对刀具利用率的影响  
Fig. 2 Effect of tool geometry parameters on tool utilization

$$\psi(\gamma_0) = (a\gamma_0^2 + b\gamma_0 + c) \sin(d\gamma_0^2 + e\gamma_0 + f) + g. \tag{3}$$

$$\psi(\gamma_0) = (0.134\gamma_0^2 - 2.985\gamma_0 + 22.976) \times \sin(0.00308\gamma_0^2 + 0.156\gamma_0 + 2.179) + 23.012; \tag{4}$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = 0.9642. \tag{5}$$

式中: SSR 为回归平方和; SSE 为残差平方和; SST 为总平方和, 即  $SST = SSR + SSE$ .  $R^2$  为相关系数, 范围为 0 到 1 之间, 其值接近于 1, 表明模型的拟合效果好。

同理, 拟合得到刀具利用率关于后角  $\alpha_0$  和刀尖圆弧半径  $r$  的一元模型为式(6)和式(7):

$$\psi(\alpha_0) = (-0.127\alpha_0^2 + 5.967\alpha_0 - 94.212) \times \sin(0.0105\alpha_0^2 - 0.145\alpha_0 + 2.686) + 60.124; \tag{6}$$

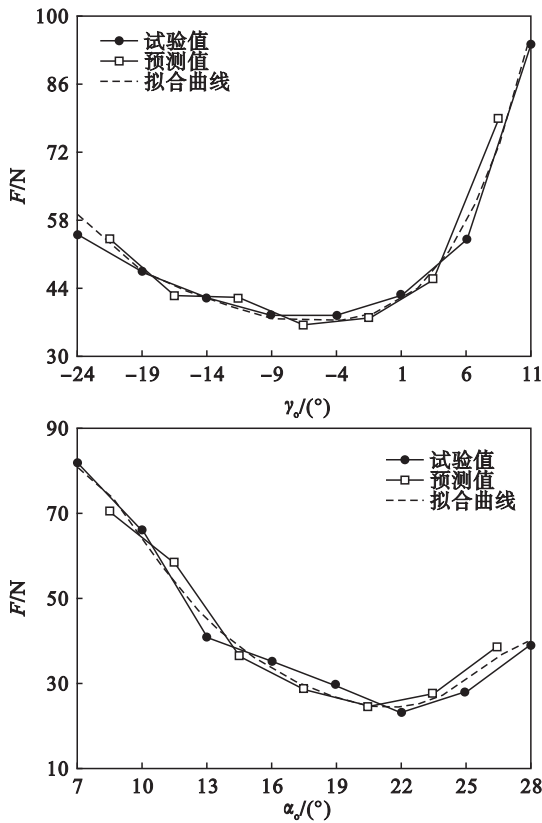
$$R^2 = 0.9734.$$

$$\psi(r) = (-75.626r^2 + 176.413r - 104.466) \times \sin(-16.214r^2 + 24.981r - 25.965) + 81.474; \tag{7}$$

$$R^2 = 0.9817.$$

2.4 刀具几何参数对切削力的影响

关于刀具几何参数对切削力的影响如图 3 所示, 拟合得到的一元模型如式(8)~式(10)所示。



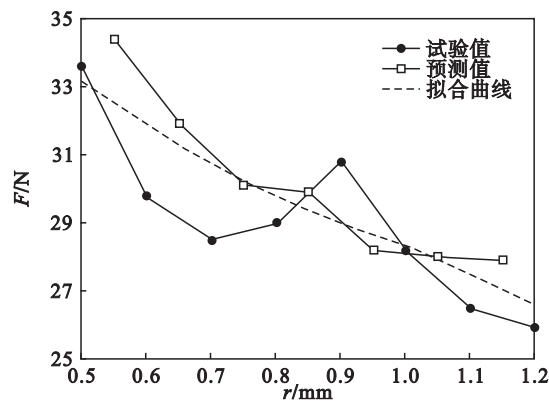


图 3 刀具几何参数对切削力的影响

Fig. 3 Effect of tool geometry parameters on cutting force

$$F(\gamma_o) = (0.210\gamma_o^2 - 8.429\gamma_o + 146.095) \times \sin(-0.00149\gamma_o^2 + 0.00892\gamma_o + 2.833) - 4.180; \quad (8)$$

$$R^2 = 0.9861.$$

$$F(\alpha_o) = (0.316\alpha_o^2 - 8.750\alpha_o - 77.275) \times \sin(0.0851\alpha_o^2 - 0.529\alpha_o + 5.121) + 50.341; \quad (9)$$

$$R^2 = 0.9794.$$

$$F(r) = (3.054r^2 - 1.382r + 12.472) \times \sin(0.217r^2 - 1.703r - 0.0402) + 42.481; \quad (10)$$

$$R^2 = 0.9766.$$

2.5 刀具磨损形貌

采用 OLYMPUS 超景深显微镜拍摄不同单因素试验条件下刀具利用率最高的刀片磨损形貌。前角、后角和刀尖圆弧半径所对应的最高刀具利用率分别为 81.62(实验 4)、84.63(实验 14)和 86.21(实验 24),其对应前刀面及后刀面的磨损形态如图 4 所示。

几何参数不同的刀片会不同程度地影响刀尖强度和车削过程的切削力大小,进而影响刀具后刀面与已加工表面的摩擦程度和切削时产生的热应力大小,导致刀具磨损的体积不同,表征为刀具

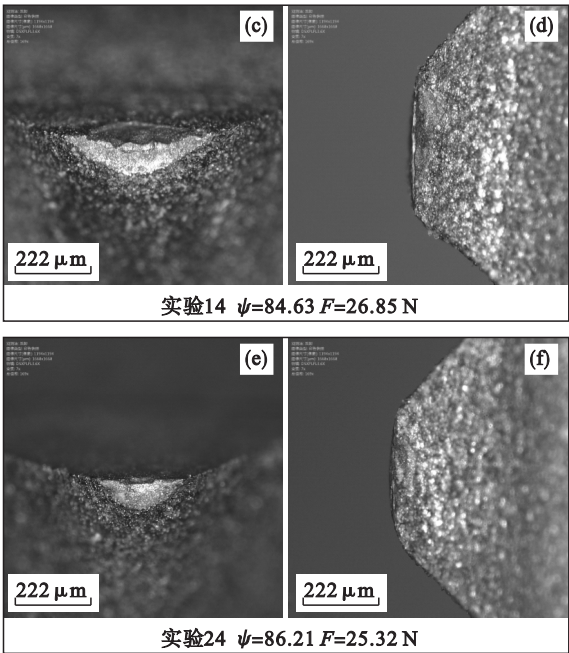


图 4 三种实验条件下的 YG6 刀具磨损形态

Fig. 4 Wear morphology of YG6 tool tips under three experimental conditions

- (a) —  $\gamma_o = -9^\circ, \alpha_o = 19^\circ, r = 0.5 \text{ mm}$ , 后刀面;
- (b) —  $\gamma_o = -9^\circ, \alpha_o = 19^\circ, r = 0.5 \text{ mm}$ , 前刀面;
- (c) —  $\gamma_o = -9^\circ, \alpha_o = 22^\circ, r = 0.5 \text{ mm}$ , 后刀面;
- (d) —  $\gamma_o = -9^\circ, \alpha_o = 22^\circ, r = 0.5 \text{ mm}$ , 前刀面;
- (e) —  $\gamma_o = -9^\circ, \alpha_o = 19^\circ, r = 1.2 \text{ mm}$ , 后刀面;
- (f) —  $\gamma_o = -9^\circ, \alpha_o = 19^\circ, r = 1.2 \text{ mm}$ , 前刀面。

利用率的变化。当刀具磨损严重时,切削力呈上升趋势,刀具利用率呈下降趋势。

3 基于 PSO 的多元模型求解与检验

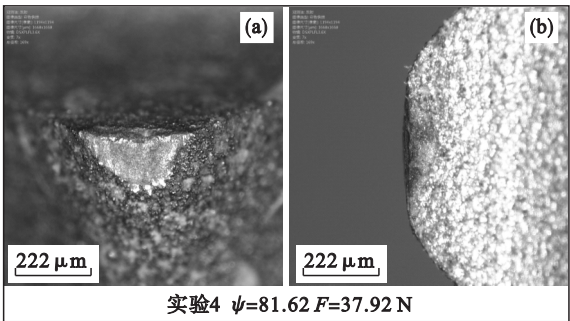
3.1 PSO 算法原理

PSO 算法是从鸟群觅食最优策略的行为特征中得到启示的一类智能优化算法。算法中每个粒子都视为优化问题的一个潜在可行解,且都有一个由被优化函数决定的适应度值。每个粒子的速度变量决定了其移动的方向和所在的位置,且速度随粒子的移动经验进行动态调整,从而实现粒子在可行解空间中找到最优解<sup>[13]</sup>。

3.2 多元模型假设

基于刀具利用率和切削力关于刀具几何参数的一元模型(式(4)和式(6)~(10)),分别提出 YG6 车削氧化锆陶瓷的刀具利用率和切削力关于刀具几何参数的多元模型,如式(11)和式(12)所示。

$$\psi(\gamma_o, \alpha_o, r) = (m_1\gamma_o^2\alpha_o^2r^2 + m_2\gamma_o\alpha_or + m_3) \times$$



实验4  $\psi=81.62$   $F=37.92 \text{ N}$



$$\sin(m_4\gamma_o^2\alpha_o^2r^2+m_5\gamma_o\alpha_or+m_6)+m_7; \quad (11)$$
$$F(\gamma_o,\alpha_o,r)=(n_1\gamma_o^2\alpha_o^2r^2+n_2\gamma_o\alpha_or+n_3)\times$$
$$\sin(n_4\gamma_o^2\alpha_o^2r^2+n_5\gamma_o\alpha_or+n_6)+n_7. \quad (12)$$

式中: $m_1\sim m_7$  和  $n_1\sim n_7$  均为常数,由氧化锆陶瓷和刀具的材料属性共同决定.

3.3 多元模型求解

基于 12 组正交试验(第 1,2,4,5,6,8,9,10,12,13,14,16 组,见表 3)结果,以多元模型计算值与正交试验值的方差最小作为适应度准则(见式(13)),利用 PSO 算法对多元模型进行优化建模,并通过 4 组验证实验(第 3,7,11,15 组,见表 3)对所建模型进行验证.

$$Fit_1=\min\left[\sum_{i=1}^n(X_i-X_i^0)^2\right]. \quad (13)$$

式中: $X_i$  为多元模型计算值; $X_i^0$  为正交试验值.

经过 PSO 算法优化求解后的刀具利用率和切削力多元模型如式(14)和式(15)所示. 利用验证实验对模型进行检验,计算所得的相对误差如表 4 所示.

$$\psi(\gamma_o,\alpha_o,r)=(-0.000\,227\gamma_o^2\alpha_o^2r^2+0.064\,1\gamma_o\alpha_or+42.335)\times\sin(-0.082\,9\times$$
$$\gamma_o^2\alpha_o^2r^2-0.081\,5\gamma_o\alpha_or+5.050)+53.462; \quad (14)$$
$$F(\gamma_o,\alpha_o,r)=(-0.000\,655\gamma_o^2\alpha_o^2r^2+0.008\,7\gamma_o\alpha_or+46.839)\times\sin(0.057\,6\gamma_o^2\alpha_o^2r^2+0.029\,6\gamma_o\alpha_or+0.994)+67.312. \quad (15)$$

实验序号	表 4 相对误差			%
	Table 4	Relative error		
实验序号	3	7	11	15
刀具利用率的相对误差	8.24	4.09	6.85	3.68
切削力的相对误差	9.32	6.23	8.43	9.87

4 双目标刀具几何参数优化

在生产加工过程中,期望选择一组工艺参数,在保持较高刀具利用率的同时,使切削力尽可能地小,以获得理想的加工质量、较高的生产效率和较小的刀具磨损. 在实际加工范围条件下,结合切削力和刀具利用率的多元模型,建立双目标优化模型:

$$H_1=\max\{\psi(\gamma_o,\alpha_o,r)\},$$
$$H_2=\min\{F(\gamma_o,\alpha_o,r)\};$$
$$\left. \begin{aligned} \gamma_o &= -26^\circ \sim 15^\circ, \\ \alpha_o &= 2^\circ \sim 24^\circ, \\ r &= 0.2 \sim 1.5\text{ mm}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

基于 PSO 算法进行优化求解. 在建立适应度函数时,因刀具利用率  $\psi$  取最大值,切削力  $F$  取最小值,为使双目标取向统一,将  $\psi$  取倒数,得到适应度函数:

$$Fit_2=F+1/\psi. \quad (17)$$

最终求解得到最优刀具几何参数为: $\gamma_o=-5^\circ$ ,  $\alpha_o=19^\circ$ ,  $r=1.1\text{ mm}$ ,此时对应的刀具利用率为 90.8,切削力为 23.6 N. 解的适应度进化如图 5 所示.

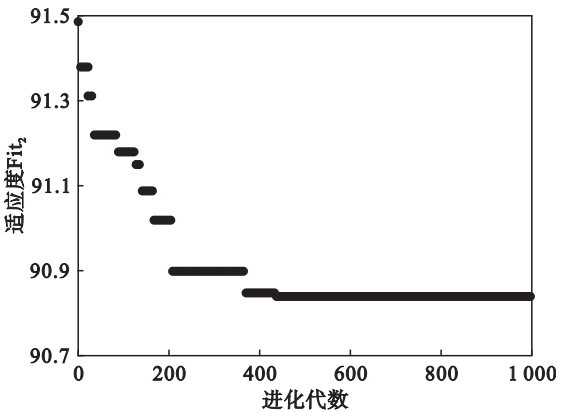


图 5 适应度进化过程图  
Fig. 5 Adaptive evolution process

以优化结果作为车削氧化锆陶瓷的刀具几何参数进行验证实验,重复开展两次实验,刀具磨损形态如图 6 所示,结果显示刀具利用率为 91.7,切削力为 25.3 N,相对误差分别为 9.81% 和 6.71%. 与非优化的刀具几何参数实验结果相比,刀具利用率得到提高,切削力有所减小,证明优化求解得到的刀具几何参数较为合理.

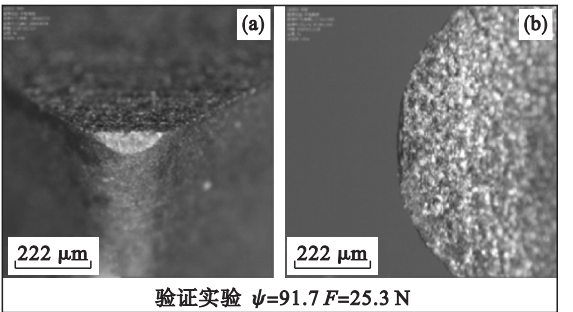


图 6 验证实验的 YG6 刀具磨损形态  
Fig. 6 Wear morphology of YG6 tool tips in verification experiment

(a)— $\gamma_o=-5^\circ$ ,  $\alpha_o=19^\circ$ ,  $r=1.1\text{ mm}$ ,后刀面;  
(b)— $\gamma_o=-5^\circ$ ,  $\alpha_o=19^\circ$ ,  $r=1.1\text{ mm}$ ,前刀面.

5 结 论

1) 基于 PSO 优化的 BP 神经网络预测值和单因素实验值,利用最小二乘拟合,建立了刀具利用率和切削力分别关于各刀具几何参数的一元模型,通过相关系数证明了模型具有较高的可靠度.

2) 通过对一元模型的整合分析,建立了刀具利用率和切削力分别关于刀具几何参数的多元模型,结合正交实验值,基于 PSO 算法对模型进行优化求解,通过验证实验表明了模型具有较高的精度。

3) 以刀具利用率和切削力的多元模型为目标函数,利用 PSO 算法进行了刀具几何参数的双目标优化,获得了一组优化后的刀具几何参数,验证实验结果表明优化参数较为合理。

## 参考文献:

- [1] Yang Z C, Zhu L D, Ni C B, et al. Investigation of surface topography formation mechanism based on abrasive-workpiece contact rate model in tangential ultrasonic vibration-assisted CBN grinding of  $ZrO_2$  ceramics [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 155: 66–82.
- [2] Xiao X Z, Zheng K, Liao W H, et al. Study on cutting force model in ultrasonic vibration assisted side grinding of zirconia ceramics [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 104: 58–67.
- [3] Fledrich G, Palinkas I, Keresztes R, et al. Turning specialities of  $ZrO_2$  ceramics [J]. *Sustainable Construction and Design*, 2011, 2(1): 59–65.
- [4] 马廉洁, 曹小兵, 巩亚东, 等. 基于遗传算法与 BP 神经网络的微晶玻璃点磨削工艺参数优化 [J]. *中国机械工程*, 2015, 26(1): 102–106.  
(Ma Lian-jie, Cao Xiao-bing, Gong Ya-dong, et al. Process parameter optimization based on BP neural networks and GA in point grinding low expansion glass [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(1): 102–106.)
- [5] Campocasso S, Costes J P, Fromentin G, et al. A generalized geometrical model of turning operations for cutting force modelling using edge discretisation [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(21): 6612–6630.
- [6] Ma L J, Gong Y D, Chen X H. Study on surface roughness model and surface forming mechanism of ceramics in quick

point grinding [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2014, 77: 82–92.

- [7] Zhang C, Liu X, Fang J, et al. A new tool wear estimation method based on shape mapping in the milling process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 53(1/2/3/4): 121–130.
- [8] 石莉, 巩亚东, 姜增辉, 等. S30T 正交车铣 TC4 钛合金磨损形貌及机理分析 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(8): 1133–1136.  
(Shi Li, Gong Ya-dong, Jiang Zeng-hui, et al. Experimental analysis toward wear characteristics and mechanisms for S30T tools through orthogonal turning-milling on TC4 titanium alloy [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2017, 38(8): 1133–1136.)
- [9] 蒋天一, 胡德金, 许开州, 等. 改进型 BP 神经网络对球面磨削最高温度的模拟与预测 [J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(6): 901–906.  
(Jiang Tian-yi, Hu De-jin, Xu Kai-zhou, et al. Simulation and prediction of the maximum temperature in sphere grinding with improved BP neural network model [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2011, 45(6): 901–906.)
- [10] Li X W, Cho S J, Kim S T. Combined use of BP neural network and computational integral imaging reconstruction for optical multiple-image security [J]. *Optics Communications*, 2014, 315: 147–158.
- [11] Al-geelani N A, Piah M A M, Adzis Z, et al. Hybrid regrouping PSO based wavelet neural networks for characterization of acoustic signals due to surface discharges on H. V. glass insulators [J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(12): 4622–4632.
- [12] Chauhan P, Pant M, Deep K. Parameter optimization of multi-pass turning using chaotic PSO [J]. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2015, 6(2): 319–337.
- [13] 朱成实, 勾延生, 李铁军, 等. 基于改进 PSO 算法的数控机床主轴优化设计 [J]. *中国机械工程*, 2015, 26(20): 2784–2788.  
(Zhu Cheng-shi, Gou Yan-sheng, Li Tie-jun, et al. Optimization design of CNC machine tool spindle based on improved PSO algorithm [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(20): 2784–2788.)