

# 硬质合金刀片前刀面的剪切增稠抛光实验研究

柯明峰, 吕冰海, 邵蓝樱, 邵琦, 周亚峰, 王佳焕, 袁巨龙

(浙江工业大学 机械工程学院, 杭州 310023)

**摘要:** **目的** 采用柔性的剪切增稠抛光 (STP) 方法抛光开设有弧形断屑槽的硬质合金刀片前刀面, 降低其粗糙度, 提高刀具的切削性能。**方法** 利用非牛顿幂率流体的剪切增稠效应与磨粒的微切削作用, 实现对工件粗糙表面的微凸峰去除。以前刀面断屑槽的表面粗糙度为评价指标, 采用田口法设计正交实验, 分析抛光速度、磨粒浓度、倾斜角度以及磨粒粒度等抛光工艺参数对刀片前刀面表面粗糙度的影响, 采用方差分析 (ANOVA) 法评估各因素的有效权重, 得到优化工艺参数组合。**结果** 抛光速度对表面粗糙度的影响最大, 为 74%; 磨粒粒度与磨粒浓度次之, 均为 11%; 倾斜角度对刀片前刀面表面粗糙度的影响最小, 仅为 4%。在抛光速度为 85 r/min、磨粒浓度为 9% (质量分数)、倾斜角度为 2°以及磨粒粒度为 #8000 的优化工艺参数组合下进行抛光实验, 抛光 15 min 后, 刀片前刀面断屑槽表面粗糙度从  $(120 \pm 20)$  nm 下降到  $(7.2 \pm 0.6)$  nm, 微观粗糙峰变得平滑, 刃口完整无缺陷。**结论** 相对于传统毛刷抛光方法, 剪切增稠抛光方法抛光硬质合金刀片前刀面的效率更高, 抛光质量更好。通过优化抛光工艺参数, 可以有效提高刀片表面质量, 且不会造成刃口缺陷, 为硬质合金刀片高效高质量抛光提供了新的方法。

**关键词:** 硬质合金刀片; 剪切增稠抛光; 表面粗糙度; 田口法; 方差分析

中图分类号: TG356.28 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2022)01-0220-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.01.023

## Experimental Study on Shearing Thickening Polishing of Rake Surface of Cemented Carbide Inserts

KE Ming-feng, LYU Bing-hai, SHAO Lan-ying, SHAO Qi, ZHOU Ya-feng, WANG Jia-huan, YUAN Ju-long

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**ABSTRACT:** A flexible shearing thickening polishing (STP) method can be used to polish the rake surface of the cemented carbide insert with arc chipbreaker to reduce the roughness of the rake surface and improve the cutting performance of the insert. The method utilizes the shearing thickening effect of non-Newtonian power-law fluid and the micro-cutting effect of abrasive particles to remove the micro-convex peaks on the rough surface of the workpiece. The surface roughness of the chipbreaker of the cemented carbide insert rake surface is used as the evaluation index. The Taguchi method is used to design the orthogonal

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-06-11

Received: 2021-03-29; Revised: 2021-06-11

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LR17E050002)

Fund: Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LR17E050002)

作者简介: 柯明峰 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超精密磨粒加工技术。

Biography: KE Ming-feng (1995—), Male, Master's degree, Research focus: ultra precision abrasive machining technology.

通讯作者: 吕冰海 (1978—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为超精密磨粒加工技术。

Corresponding author: LYU Bing-hai (1978—), Male, Ph. D., Researcher, Research focus: ultra precision abrasive machining technology.

引文格式: 柯明峰, 吕冰海, 邵蓝樱, 等. 硬质合金刀片前刀面的剪切增稠抛光实验研究[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 220-228.

KE Ming-feng, LYU Bing-hai, SHAO Lan-ying, et al. Experimental Study on Shearing thickening Polishing of Rake Surface of Cemented Carbide Inserts[J]. Surface Technology, 2022, 51(1): 220-228.

experiment, and the influence of polishing speed, abrasive concentration, abrasive particlesize and inclination angle on the surface roughness of the insert rake surface is analyzed. The analysis of variance (ANOVA) method, which is used to evaluate the effective weight of each factor, shows that the largest affecting factor for the surface roughness is the polishing speed (74%), followed by the abrasive particle size (11%), the abrasive concentration (11%) and the inclination angle (4%). Under the optimized process parameter combination: polishing speed 85 r/min, abrasive concentration 9wt%, inclination angle 2° and abrasive particlesize #8000, the surface roughness decreases from (120±20) nm to (7.2±0.6) nm, the rough micro-convex peaks become smooth and the cutting edge is complete without defects. Compared with traditional brush polishing method, STP method can realize higher efficiency and better quality for polishing the rake surface of the cemented carbide insert. By optimizing the polishing process parameters, the surface quality of the insert can be effectively improved and no defects are caused on the cutting edge. The result shows that the STP is a promising method for the efficient and high-quality polishing of the cemented carbide insert.

**KEY WORDS:** cemented carbide insert; shearing thickening polishing; surface roughness; Taguchi method; analysis of variance

硬质合金刀片具有高耐磨性、高硬度、耐腐蚀性等优良的力学和化学性能,被广泛应用于航空航天、矿山采掘、石油输送等制造领域难加工金属/非金属材料去除加工<sup>[1-3]</sup>。减小硬质合金刀片表面粗糙度,提高刀片表面质量是提升刀片寿命及其性能的重要手段之一<sup>[4]</sup>。一方面,涂层刀具需要在涂覆涂层前对刀具进行抛光,去除基体表面杂质,提高硬质合金刀片基体与涂层材料的粘结力<sup>[5-7]</sup>。另一方面,低表面粗糙度的刀具前刀面可以改善刀具与切屑之间的摩擦粘结状态,抑制或消除积屑,提高刀具的切削性能<sup>[8-9]</sup>。毛刷抛光(Brushing Polishing, BP)方法是硬质合金刀片传统的抛光方法。Denkena等<sup>[10]</sup>研究发现,该方法可以通过调整工艺参数,显著改变切削刃钝圆尺寸。曾伟、王乐、王晓峰等人<sup>[11-13]</sup>研究了磨料粒度、毛刷材质及运动形式、接触长度以及抛光时间等工艺参数对刀具刃口钝化抛光的影响,抛光处理后的刀具,寿命显著提高。虽然磨料毛刷抛光法效率较高,但刀具刃口易出现崩刃、豁口等微观缺陷,毛刷材料易氧化变软,降低抛光效率。袁巨龙等<sup>[14]</sup>建立了硬质合金化学机械抛光(Chemical Mechanical Polishing, CMP)材料去除率MRR和表面粗糙度Ra的预测模型,在常用工艺条件(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>氧化剂、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>磨粒以及聚氨酯抛光垫)下,表面粗糙度达到了48 nm,但仅能抛光平面零件。Zhang等人<sup>[15]</sup>采用电流变抛光(Electrorheological Polishing, ERP)工艺,研究了不同参数对硬质合金工件表面粗糙度的影响。实验结果表明,ERP虽能降低工件表面粗糙度,但抛光效率较低。Puoza<sup>[16]</sup>研究了磨料水射流抛光(Abrasive Water-jet Polishing, AWJT)的工艺参数对硬质合金刀具表面质量的影响。当喷射角为15°、喷射压力为10 MPa时,刀具表面获得了较好的抛光效果,但表面粗糙度停留在亚微米水平。

剪切增稠抛光(STP)<sup>[17]</sup>利用非牛顿幂率流体的剪切增稠效应与磨粒的微切削作用,实现对工件粗糙表面微凸峰的去除,达到复杂曲面高效、高表面质量

抛光的目的。Lyu等<sup>[18]</sup>对钽酸锂基片的剪切增稠抛光实验表明,4 min内,工件表面粗糙度Ra从200.5 nm降至4.2 nm。SHAO等<sup>[19]</sup>利用剪切增稠抛光方法抛光高温镍基合金涡轮叶片凹面,在优选的工艺参数组合下抛光9 min后,叶片内凹表面粗糙度从72.3 nm快速下降到4.2 nm。李敏等<sup>[20]</sup>根据Preston方程,建立了剪切增稠抛光的材料去除模型,并通过抛光实验验证了去除模型的有效性。杨易彬等<sup>[21]</sup>利用剪切增稠抛光方法抛光铝合金锥镜表面,改善了其表面质量,有效提高了锥镜反射光线的集中度。宋志龙等<sup>[22]</sup>基于BP神经网络,建立了确定性剪切增稠抛光材料去除率预测模型,为提高剪切增稠抛光过程的可控性提供了一种新方法。

针对复杂形状硬质合金刀片传统抛光方法(如毛刷抛光方法等)难以实现其前刀面高效、高质量抛光的问题,本文采用剪切增稠抛光方法,利用非牛顿流体抛光液的剪切增稠效应,形成可贴合复杂形状表面的柔性“固着磨具”,实现复杂形状硬质合金刀片前刀面(开设有弧形断屑槽)的高效、高表面质量抛光。采用田口法设计了正交实验,分析了剪切增稠抛光过程中抛光速度、磨粒浓度、倾斜角度与磨粒粒径对硬质合金刀片前刀面表面粗糙度的影响,用方差分析(ANOVA)法评估了每个工艺参数的权重,确定了最佳工艺参数,从而实现硬质合金刀片前刀面的高效、高质量抛光。

## 1 剪切增稠抛光硬质合金刀片原理

剪切增稠抛光硬质合金刀片前刀面的原理如图1所示。为提高刀具的断屑能力,前刀面开设有弧形的断屑槽,因此为了达到整个前刀面一次性抛光的目的,要求抛光介质具有良好的复杂曲面适应性。本研究以具有剪切增稠效应的幂率流体作为基液,添加抛光用磨粒,制备抛光液<sup>[23]</sup>。抛光液与工件之间产生相对运动,当作用于抛光液的剪切速率超过阈值时,触

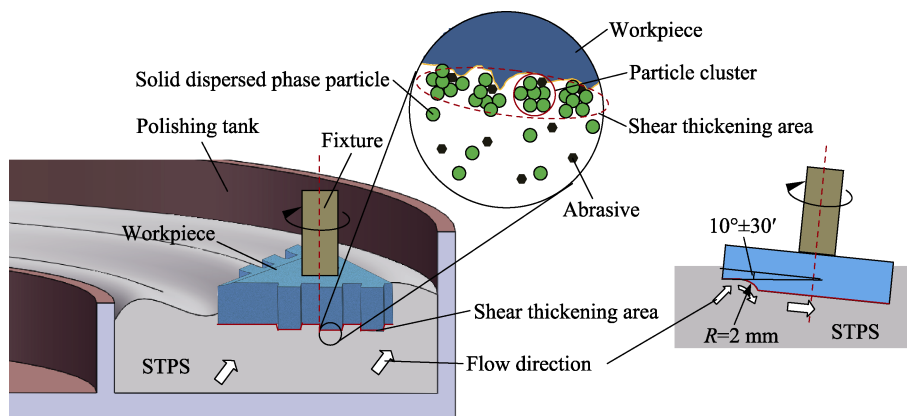


图1 STP抛光原理  
Fig.1 STP schematic diagram

发抛光液的剪切增稠效应，抛光液中的固体分散相微粒聚合形成大量包裹磨粒的“粒子簇”<sup>[24]</sup>。随着相对速度的增加，剪切增稠区域的抛光液的黏度持续增大，“粒子簇”对磨料颗粒的把持力增大，形成“柔性固结磨具”<sup>[17]</sup>，去除前刀面微观粗糙峰。由于抛光液具有良好的流动性，抛光过程中，“柔性固结磨具”能够有效贴合抛光前刀面断屑槽，从而实现整个前刀面的高效、高质量抛光。

## 2 实验

### 2.1 实验装置与过程

剪切增稠抛光实验装置与抛光示意图见图2。系统由抛光槽、夹具、剪切增稠抛光液组成，抛光槽半径为200 mm。将工件旋转中心与重力方向的夹角定

义为倾斜角度，工件安装在夹具上，并成一定倾角在剪切增稠抛光液中自转，保证了抛光液能够从各个方向有效流过断屑槽和整个前刀面，从而对整个前刀面进行均匀抛光。工件与抛光槽底端的距离设置为3 mm，夹具轴与抛光槽壁面的距离为15 mm，以满足抛光过程中有足够的抛光液能将工件浸没。

本文选取的硬质合金刀片以及尺寸如图3所示。刀片的力学性能见表1。STP抛光硬质合金刀片前刀面的实验条件见表2。根据前期的实验研究<sup>[18-19]</sup>，将抛光速度、磨粒粒度、磨粒浓度限制在了较小的取值范围。断屑槽的根部弧度为半径2 mm的圆弧，前角 $\gamma_0$ 为 $10^\circ \pm 30'$ ，为了让抛光液能顺畅流过其表面，将倾斜角度限制在 $4^\circ$ 以内。

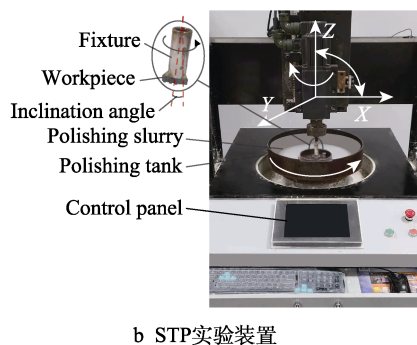
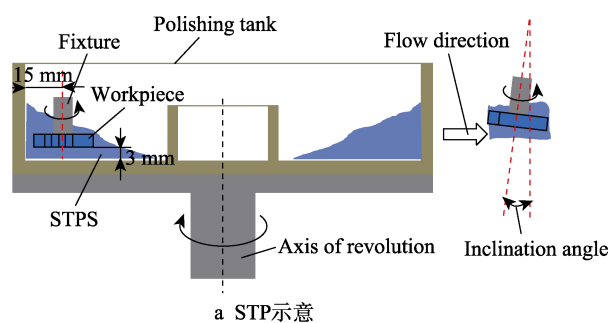


图2 STP设备原理及抛光示意图

Fig.2 STP equipment and polishing schematic diagram: a) STP equipment; b) STP schematic diagram

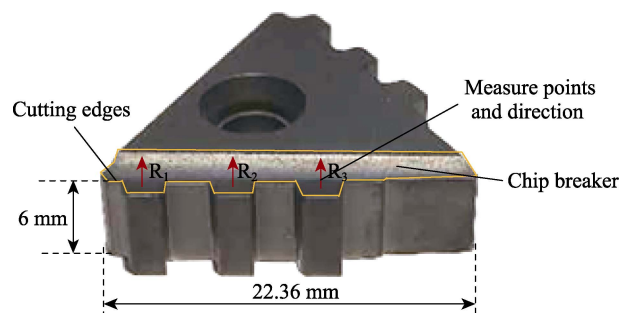


图3 刀片粗糙度测量位置  
Fig.3 Measuring position of blade roughness

表1 硬质合金刀片的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of cemented carbide inserts

Material	Density/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Flexural strength/MPa	Hardness (HRA)	Fracture toughness/( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ )
YW	13.8	1900	91.7	9.6

根据硬质合金的难加工特性，采用金刚石微粉作为磨料，添加到剪切增稠抛光液中。所制备的不同浓度#5000 金刚石抛光液的流变曲线如图4所示。随着剪切速率的增加，流体黏度呈现先增加、后减小的变化趋势，并大约在 $100 \text{ s}^{-1}$ 时达到峰值。随着磨粒浓度的增加，初始黏度增大，峰值黏度减小。

表 2 STP 实验条件  
Tab.2 Experimental conditions of STP

Parameter	Value
Workpiece	Cemented carbide insert
Initial roughness of the insert/nm	120±20
Polishing speed/( r·min <sup>-1</sup> )	75, 85, 95
Abrasive	Diamond particles
Abrasive concentration/wt%	6, 9, 12
Inclination angle/(°)	0, 2, 4
Abrasive particle size	#5000, #8000, #10000
Polishing time/min	15

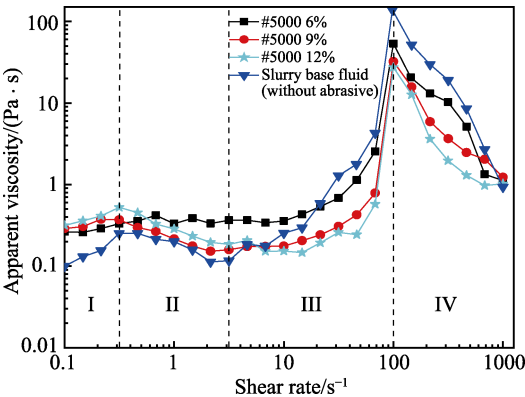


图 4 金刚石的 STP 抛光液的流变曲线  
Fig.4 Rheological curve of diamond STP slurry

选取前刀面断屑槽的 3 个刀齿位置 ( $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ) 作为 3 个测量对象, 分别取点测量它们的粗糙度, 取平均值作为最终的前刀面表面粗糙度值, 以减少测量误差。工件表面粗糙度由 Talysurf i-Series (Taylor Hobson) 测量, 测量位置以及测量方向如图 3 所示, 采样长度为 2 mm。采用超景深显微镜 (VH-Z500 Keyence)、白光干涉仪 (SuperView W1 Chotest) 以及 SEM (Sigma300 Zeiss) 观察刀片的表面微观形貌。

2.2 实验设计

抛光速度、磨粒浓度、倾斜角度以及磨粒粒径是影响硬质合金刀片前刀面抛光表面粗糙度的主要工艺参数。采用田口法<sup>[25]</sup>设计三水平四因素  $L9(3^4)$  正交实验, 见表 3。然后按公式(1), 由实验结果计算得到信噪比 ( $S/N$ ), 用来度量各因素偏离期望值的质量特性, 信噪比越大, 质量特征越好。因此, 信噪比的最大水平为工艺参数的最优水平。利用信噪比分析以及 ANOVA 分析, 预测工艺参数的最佳组合。在分析信噪比时, 通常有 3 种质量特征, 即望大特性、望小特性以及望目特性<sup>[25]</sup>。本研究以粗糙度作为评价指标, 粗糙度越小越好, 信噪比越大, 参数水平越优。

$$S/N = -10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

式中:  $n$  为表面粗糙度测试点数量,  $n=3$ ;  $i$  表示第  $i$  个粗糙度测量点;  $y_i$  为第  $i$  个点的粗糙度值。

表 3  $L9(3^4)$  正交试验方案  
Tab.3  $L9(3^4)$  Orthogonal experimental scheme

No.	Polishing speed (A)/( r·min <sup>-1</sup> )	Abrasive concentration (B)/wt%	Inclination angle (C)/(°)	Abrasive size (D)
1	75	6	0	#5000
2	75	9	2	#8000
3	75	12	4	#10 000
4	85	6	2	#10000
5	85	9	4	#5000
6	85	12	0	#8000
7	95	6	4	#8000
8	95	9	0	#10 000
9	95	12	2	#5000

3 结果与讨论

3.1  $S/N$  平均响应分析

硬质合金刀片前刀面粗糙度的测试结果与  $S/N$  比值见表 4。前刀面表面粗糙度随平均  $S/N$  的变化趋势如图 5 所示。抛光速度、磨粒浓度、倾斜角度以及磨粒粒度的平均  $S/N$  在各自水平为 2 时取得最大值,

表 4  $L9(3^4)$  正交试验结果  
Tab.4  $L9(3^4)$  orthogonal experimental results

$i$	$Ra/nm$				$\frac{S}{N}/dB$
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	Average value	
1	26.5	28.2	27.9	27.5	-28.8003
2	15.1	15.4	16.6	15.7	-23.9254
3	12.8	13.1	13.4	13.1	-22.3469
4	10.3	11.3	11.9	11.1	-20.9736
5	7.7	8.1	7.4	7.7	-17.7733
6	7.8	9.0	9.3	8.7	-18.8144
7	9.8	9.2	9.7	9.5	-19.6185
8	10.1	10.4	10.1	10.2	-20.1728
9	11.6	10.7	10.3	10.9	-20.7328

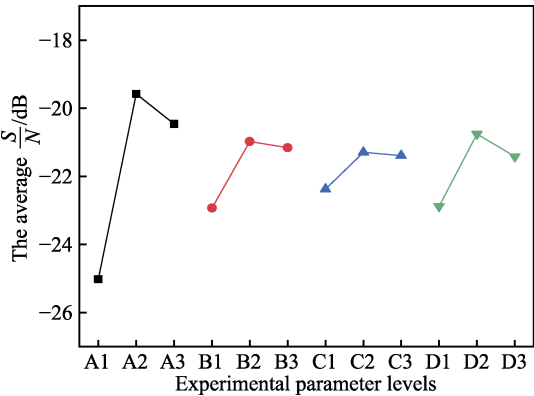


图 5 各因素对表面粗糙的影响  
Fig.5 Influence of various factors on surface roughness



分别为-19.58、-20.98、-21.29、-20.76。因此,降低硬质合金刀片前刀面的最佳工艺参数方案为A2B2C2D2,即抛光速度为85 r/min,磨粒浓度为9% (质量分数,全文同)、倾斜角度为2°,磨粒粒度为#8000。

### 3.1.1 抛光速度的影响

随着抛光速度的增大,平均  $S/N$  呈现先增大、后减小的变化趋势。抛光速度对实验结果的影响比较明显。在75、85、95 r/min的抛光速度下,硬质合金刀片前刀面抛光15 min后的表面粗糙度  $R_a$  从 $(120 \pm 20)$  nm分别下降到18.44、9.53、10.54 nm。一方面,抛光速度直接影响了剪切增稠抛光液的流变特性,随着抛光速度的增大,抛光液与工件间的剪切速率随之增大,抛光区域的流体黏度上升,工件受到抛光液的作用力增加,抛光效率提高。另一方面,根据文献[20]基于Preston方程对剪切增稠抛光材料去除速率的讨论,抛光速度与材料去除效率直接相关,随着抛光速度的增加,抛光效率上升。但当抛光速度从85 r/min增加到95 r/min时,抛光相同时间后,表面粗糙度反而变差。这主要是由于过大的抛光速率,导致抛光液中的磨粒受到较大离心力的作用而甩向抛光槽壁面(如图6所示),不能有效参与刀具前刀面的材料去除过程,导致抛光效率降低,从而在相同的抛光时间内,所获得的表面粗糙度有所增大。

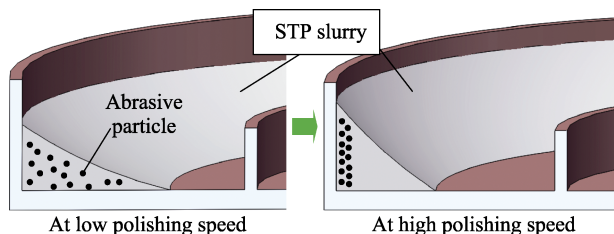


图6 离心力对STP抛光液磨料颗粒的分布影响

Fig.6 Effect of centrifugal force on the distribution of abrasive particles in STP slurry

### 3.1.2 磨粒浓度的影响

随着磨粒浓度的增大,平均  $S/N$  呈现先增大、后略有减小的变化趋势。在磨粒浓度为6%、9%、12%的条件下,抛光15 min后,工件表面粗糙度分别下降到15.42、11.34、11.75 nm。较高的磨粒浓度意味着有更多的磨料颗粒参与抛光,因此随着磨粒浓度的增加,抛光效率提高。然而,过高的磨粒浓度会削弱剪切增稠效果(如图4所示)。一方面,STP抛光液的峰值黏度随着磨粒浓度的增加而降低,抛光液的去除效率随之降低。另一方面,磨料浓度过高,抛光液的初始黏度增加,意味着抛光液的流动性变差,在齿隙间形成增稠结块,降低断屑槽区域抛光液的流动速率,导致前刀面的抛光效率随之下降。

### 3.1.3 磨粒粒度的影响

随着磨粒粒度的增加,平均  $S/N$  先增大、后略有

减小。抛光15 min后,在磨粒粒度为#5000、#8000、#10 000 (平均粒径分别为3、1.875、1.5  $\mu\text{m}$ )的条件下,工件表面粗糙度分别下降到15.37、11.12、12.02 nm。在相同磨粒浓度的条件下,磨粒粒径减小,参与加工的磨粒数量增加,抛光效率提升,表面粗糙度随之显著降低。但当磨料粒径小于某一临界值时,STP中参与材料去除的有效磨粒数量不会明显增加。文献[18]的研究表明,STP过程中,当磨料粒径  $d < 1.7 \mu\text{m}$  时,部分磨料颗粒将陷入固体分散相颗粒之间的间隙中,不能有效参与材料去除。因此,当磨粒粒度为#10 000 (粒径为1.5  $\mu\text{m}$ ) 时,抛光效率略有减小。

### 3.1.4 倾斜角度的影响

倾斜角度对前刀面断屑槽处的影响最小。随着倾斜角度的增大,平均  $S/N$  呈现先增大、后减小的变化趋势。抛光15 min后,在倾斜角度为0°、2°、4°的条件下,工件表面粗糙度分别下降到14.81、11.71、12.00 nm。这是由于过大或过小的倾斜角度,不利于抛光液顺利流过前刀面的断屑槽处,导致抛光效率降低。

## 3.2 方差分析

方差分析(ANOVA)量化了各个工艺参数对加工的贡献程度<sup>[26]</sup>,以评估参数作用的显著性。刀片前刀面表面粗糙度的方差分析结果如图7所示。抛光速度的影响最大,为74%,其次为磨粒粒度(11%)与磨粒浓度(11%),倾斜角度对刀片前刀面表面粗糙度的影响最小,仅为4%。

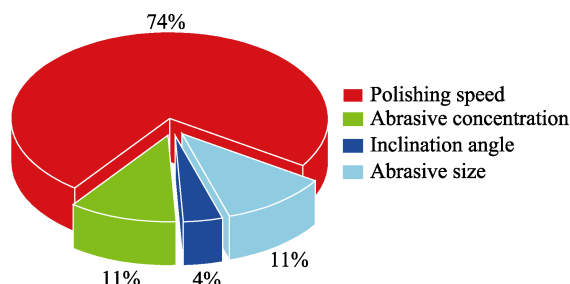


图7 ANOVA分析结果  
Fig.7 The results of ANOVA

## 3.3 验证实验

根据田口法  $S/N$  水平响应分析,得到优化硬质合金刀片前刀面的最佳工艺参数组合:抛光速度为85 r/min,磨粒浓度为9%,倾斜角度为2°,磨粒粒度为#8000。在该组合条件下进行3组重复性实验,结果取平均值,以减小误差。抛光前后的硬质合金刀片前刀面对比如图8所示。抛光后的刀片前刀面呈现出较好的镜面效果。前刀面断屑槽的三维形貌如图9所示。可以看出,抛光前的刀片前刀面断屑槽布满粗糙峰,抛光后的表面变得平滑。刀片前刀面断屑槽的SEM形貌

如图 10 所示。硬质合金刀片初始表面存在大量粗糙不平的峰谷结构，抛光 15 min 后，峰谷结构几乎被完全去除，显露出硬质合金刀片基体本身的孔隙。相对于断屑槽齿  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ，硬质合金刀片前刀面平面部分的抛光相对容易。对刀片前刀面安装平面部分的 3 个角以及中间部分进行测量，结果如图 11 所示。抛光 15 min 后，平面部分的表面粗糙度达到  $(5.8\pm0.8)$  nm。



图 8 硬质合金刀片前刀面抛光前后对比  
Fig.8 Comparison of rake surface of cemented carbide inserts before and after polishing

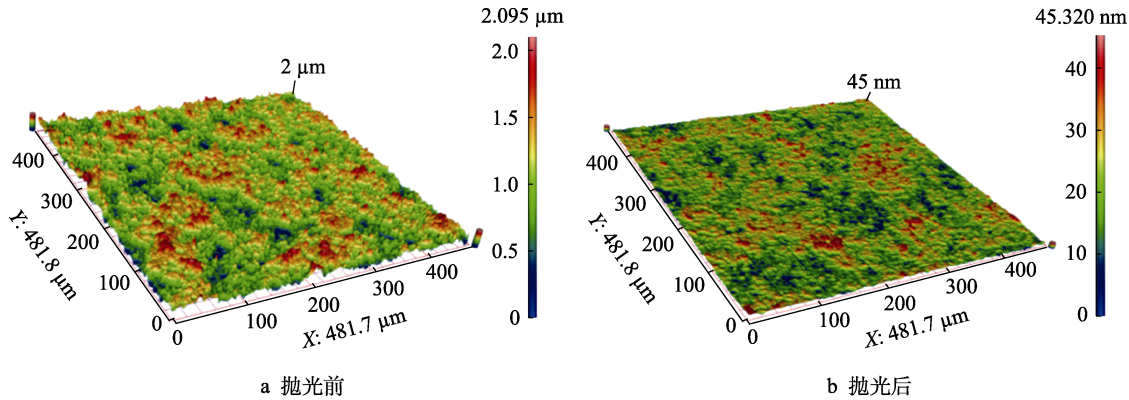


图 9 前刀面断屑槽的三维形貌  
Fig.9 3D morphology of rake surface arc chip breaker: a) before polishing; b) after polishing

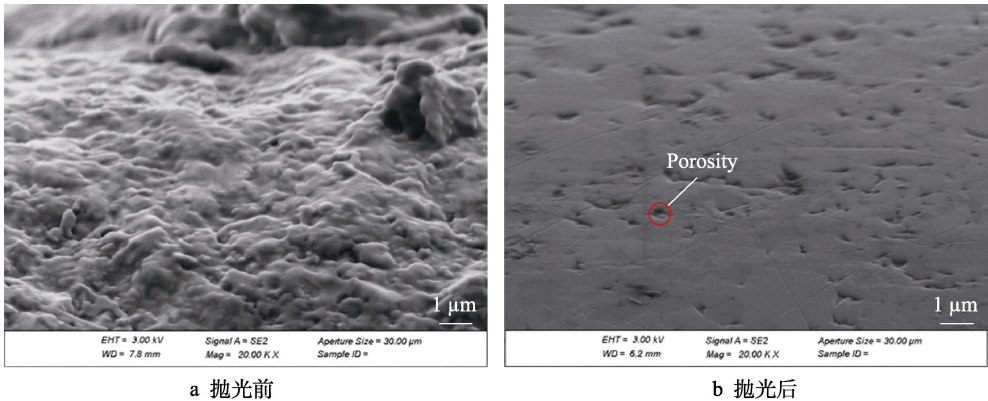


图 10 前刀面断屑槽的 SEM 照片  
Fig.10 SEM photos of rake surface arc chip breaker: a) before polishing; b) after polishing

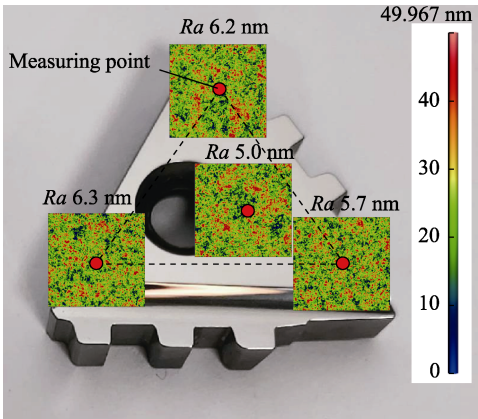


图 11 刀片前刀面平面部分粗糙度测量点及其测量值  
Fig.11 Measuring points and their surface roughness values on the flat of the insert rake surface

抛光前后前刀面上切削齿 ( $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ) 的超景深显微形貌如图 12 所示。硬质合金刀片的初始表面粗糙，抛光 15 min 后，表面微凸峰被去除，表面变得光滑，3 个切削齿刃口完整、无缺陷。

### 3.4 对比实验

毛刷抛光 (BP) 方法是传统的硬质合金刀片抛光方法。通过实验比较毛刷抛光方法与剪切增稠抛光方法对硬质合金刀片前刀面的抛光性能。毛刷工具与抛光示意如图 13 所示。采用金刚石作为磨粒，将毛刷盘固定在抛光槽中，毛刷材料选用柔软有韧性的猪鬃毛，毛刷密度为毛刷工具顶部每平方厘米的纤维数量，本实验采用密度为每平方厘米 400~450 根的毛刷工具。BP 实验条件见表 5。

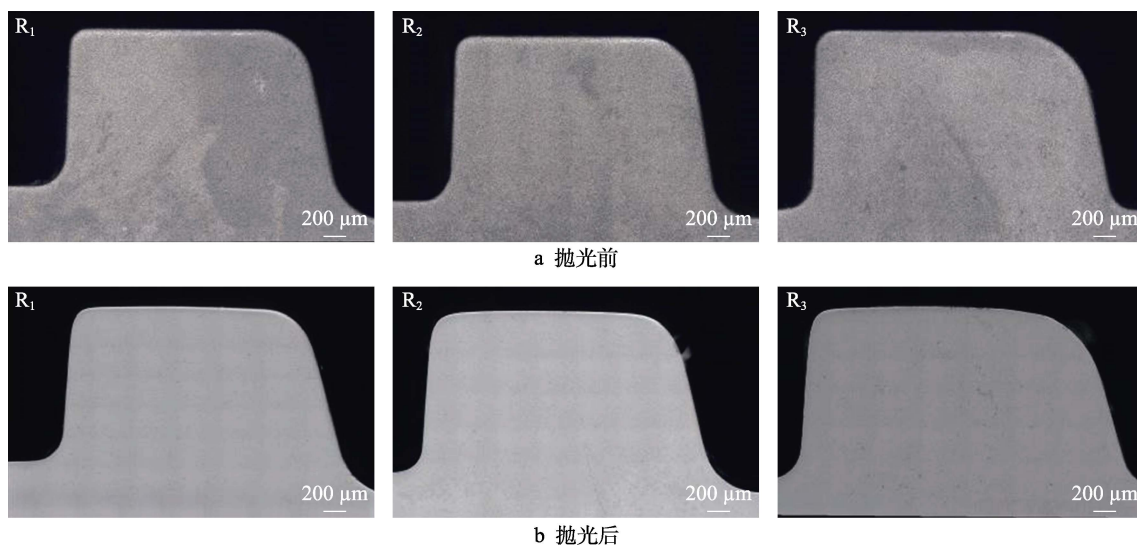


图 12 3 个切削齿 ( $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ) 抛光前后的超景深显微形貌  
Fig.12 Ultra-depth-of-field micrograph of three cutting teeth: a) before polishing; b) after polishing

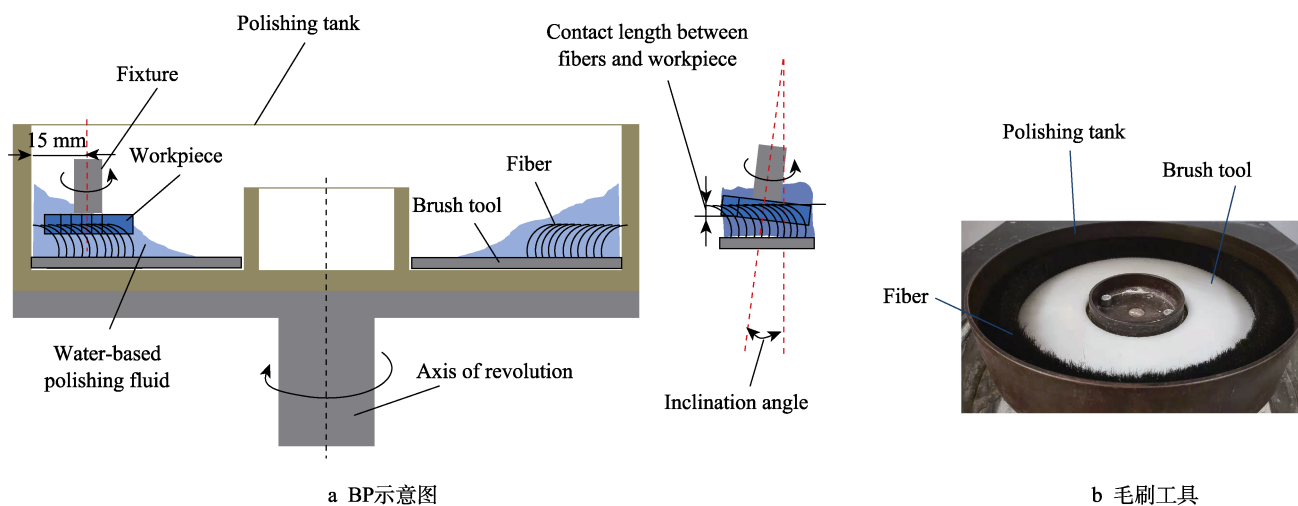


图 13 毛刷工具及抛光示意  
Fig.13 Brush tool and polishing schematic diagram: a) BP equipment; b) brush tool

表 5 BP 实验条件  
Tab.5 Experimental conditions of BP

Parameter	Value
Brush fiber material	Pig bristle
Fiber density (fibers per square centimeter)	400~450
Contact length between fibers and work-piece/mm	4
Polishing speed/( $r \cdot \min^{-1}$ )	85
Slurry base fluid	DI water
Abrasive	Diamond particles
Abrasive concentration/wt%	9
Abrasive particle size	#8000
Inclination angle/( $^{\circ}$ )	2
Polishing time/min	15

采用传统毛刷抛光 (BP) 方法与优化参数条件下的剪切增稠抛光 (STP) 方法时, 前刀面断屑槽的表面粗糙度随时间的变化趋势如图 14 所示。采用 STP 方法, 抛光前 5 min, 断屑槽的表面粗糙度 (3 个测量点的平均值) 迅速下降, 然后趋于稳定; 抛光 15 min 后, 前刀面断屑槽的表面粗糙度从初始的  $(120 \pm 20)$  nm 减小到  $(7.2 \pm 0.6)$  nm, 表面光滑。采用 BP 方法, 抛光 15 min 后, 断屑槽表面粗糙度下降至  $(43.3 \pm 3.9)$  nm, 表面质量较差。断屑槽显微照片显示, 采用 BP 方法抛光后, 断屑槽表面仍存在大量瑕疵。相对于传统抛光方法, 采用 STP 方法抛光硬质合金刀片前刀面的效率更高, 表面质量更好。



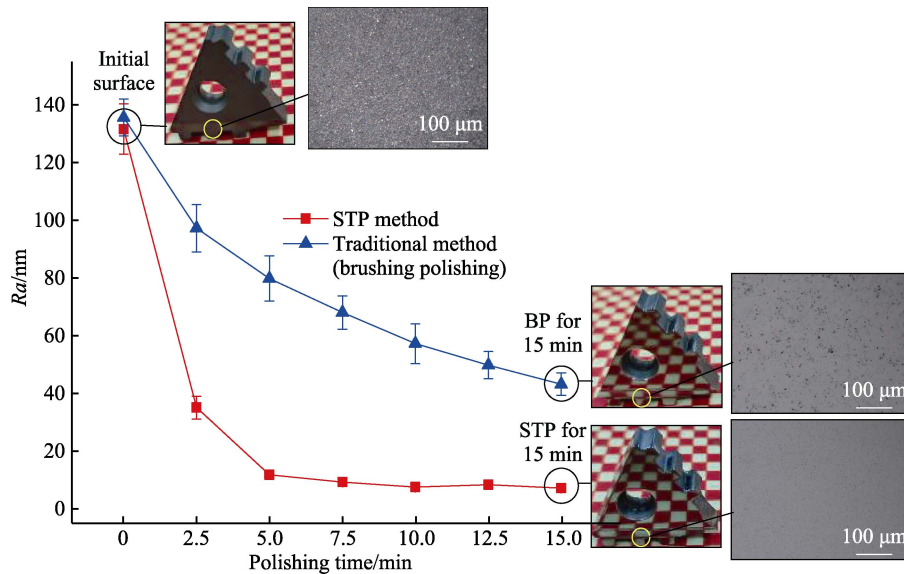


图 14 不同抛光方法下前刀面断屑槽表面粗糙度随抛光时间的变化趋势及其显微照片

Fig.14 The variation trend of surface roughness at rake surface arc chip breaker with polishing time and surfacemicrographs under different polishing method

## 4 结论

应用剪切增稠抛光方法抛光开设有弧形断屑槽的硬质合金刀片前刀面，基于田口法与方差分析，研究了抛光速度、磨粒浓度、倾斜角度、磨粒粒度对抛光的影响，并得到最佳工艺参数组合。得到的具体结论如下：

1) 分析  $S/N$  平均响应可得，硬质合金刀片前刀面的表面粗糙度在抛光速度为 85 r/min、磨粒浓度为 9%、倾斜角度为  $2^\circ$  以及磨粒粒度为 #8000 的条件下获得最小值。抛光后，表面呈现良好的镜面效果，刃口完整、无缺陷，表面粗糙度从  $(120 \pm 20)$  nm 减小到  $(7.2 \pm 0.6)$  nm。相对于传统毛刷抛光方法，采用剪切增稠抛光方法抛光硬质合金刀片前刀面的效率更高，表面质量更好。

2) 抛光速度具有最大的影响权重，为 74%，其次为磨粒粒度（11%）和磨粒浓度（11%），倾斜角度对刀片前刀面表面粗糙度的影响最小，仅为 4%。

3) 剪切增稠抛光方法可以有效提高硬质合金刀片前刀面表面质量，且不会造成刃口缺陷，为硬质合金刀片前刀面的高效高质量抛光提供了新的方法。

## 参考文献：

- [1] 贺旭东, 明伟伟, 景璐璐, 等. 高效加工刀具技术研究现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2016, 59(7): 55-59. HE Xu-dong, MING Wei-wei, JING Lu-lu, et al. Research Status and Development Trend of High Performance Machining Tools[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(7): 55-59.
- [2] BERGS T, RICHTER V, OTTERSBAACH M, et al. Tool Technologies for Milling of Hardmetals and Ceramics[J]. Procedia CIRP, 2016, 46: 299-302.
- [3] DAS S R, PANDA A, DHUPAL D. Experimental Investigation of Surface Roughness, Flank Wear, Chip Morphology and Cost Estimation during Machining of Hardened AISI 4340 Steel with Coated Carbide Insert[J]. Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes, 2017, 3: 9.
- [4] 陈明, 安庆龙, 刘志强. 高速切削技术基础与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2012. CHEN Ming, AN Qing-long, LIU Zhi-qiang. Fundamentals and Applications of High Speed Cutting[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2012.
- [5] BOUZAKIS K D, MAKRIMALLAKIS S, KATIRTZO-GLOU G, et al. Adaption of Graded Cr/CrN- Interlayer Thickness to Cemented Carbide Substrates' Roughness for Improving the Adhesion of HPPMS PVD Films and the Cutting Performance[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(5): 1564-1570.
- [6] AN S, FOEST R, FRICKE K, et al. Pretreatment of Cutting Tools by Plasma Electrolytic Polishing (PEP) for Enhanced Adhesion of Hard Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126504.
- [7] 王成勇, 邓阳, 何醒荣, 等. 微细钻铣刀具表面涂层制备及应用研究进展( I ) [J]. 硬质合金, 2019, 36(1): 1-13. WANG Cheng-yong, DENG Yang, HE Xing-rong, et al. Fabrication and Application Research of Surface Coatings on Micro-Drills and Micro-Milling Tools ( I ) [J]. Cemented Carbide, 2019, 36(1): 1-13.
- [8] TAKEKAZU S, SHINICHI T, MASAKI W, et al. Influences of Surface Roughness of Rake Face on Cutting Performance in Ductile Materials[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Progress of Machining Technology. Matsue: [s. n.], 2006.

- [9] 贾鲁, 张晓峰, 夏志辉, 等. 天然金刚石刀具前刀面的表面粗糙度控制技术[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2019, 39(2): 8-12.  
JIA Lu, ZHANG Xiao-feng, XIA Zhi-hui, et al. Surface Roughness Control Technology of Rake Face of Natural Diamond Tool[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2019, 39(2): 8-12.
- [10] DENKENA B, DE LEON L, BASSETT E, et al. Cutting Edge Preparation by Means of Abrasive Brushing[J]. Key Engineering Materials, 2010, 438: 1-7.
- [11] 曾伟, 牟伟旭, 王培, 等. 毛刷式机械抛光毛刷磨损及加工效率的研究[J]. 工具技术, 2013, 47(7): 13-17.  
ZENG Wei, MOU Wei-xu, WANG Pei, et al. Study on Brush Wear and Polishing Efficiency by Mechanical Polishing with Brush[J]. Tool Engineering, 2013, 47(7): 13-17.
- [12] 王乐, 张伟. 毛刷式钝化机对硬质合金钻头刃口钝化试验研究[J]. 煤矿机械, 2012, 33(12): 58-59.  
WANG Le, ZHANG Wei. Test and Study of Brush-Polishing Machine to Edge Hones of Carbide Drill[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(12): 58-59.
- [13] 王晓峰, 张国福. 毛刷式数控钝化机在重型铣削刀片刃口钝化中的应用[J]. 工具技术, 2011, 45(5): 68-70.  
WANG Xiao-feng, ZHANG Guo-fu. Application of CNC Brushing-Polishing Machine on Edge Radiusing for Heavy Milling Inserts[J]. Tool Engineering, 2011, 45(5): 68-70.
- [14] 袁巨龙, 毛美姣, 李敏, 等. 基于响应曲面法的 YG8 硬质合金刀片化学机械抛光工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2018, 29(19): 2290-2297.  
YUAN Ju-long, MAO Mei-jiao, LI Min, et al. Optimization of CMP Processing Parameters for YG 8 Cemented Carbide Inserts Based on RSM[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(19): 2290-2297.
- [15] ZHANG Lei, KURIYAGAWA T, KAKU T, et al. Investigation into Electrorheological Fluid-Assisted Polishing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(12-13): 1461-1467.
- [16] PUOZA J C. Experimental Study on Abrasive Water-Jet Polishing of Cemented Carbide and Polycrystalline Diamond Tools[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2019, 9(3): 200.
- [17] LI Min, LYU Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Shear-Thickening Polishing Method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 94: 88-99.
- [18] LYU B H, SHAO Q, HANG W, et al. Shear Thickening Polishing of Black Lithium Tantalite Substrate[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(9): 1663-1675.
- [19] SHAO Qi, LYU Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Shear Thickening Polishing of the Concave Surface of High-Temperature Nickel-Based Alloy Turbine Blade[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 72-84.
- [20] 李敏, 吕冰海, 袁巨龙, 等. 剪切增稠抛光材料去除数学模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 142-151.  
LI Min, LÜ Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Material Removal Mathematics Model of Shear Thickening Polishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 142-151.
- [21] 杨易彬, 吕冰海, 宋志龙, 等. 铝合金锥镜化学增强力流抛光优化实验研究[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 329-337.  
YANG Yi-bin, LYU Bing-hai, SONG Zhi-long, et al. Optimization Experiment for Chemistry Enhanced Shear Thickening Polishing of Aluminum Alloy Conical Mirror[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 329-337.
- [22] 宋志龙, 吕冰海, 柯明峰, 等. 基于 BP 神经网络的确定性剪切增稠抛光材料去除率模型[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 320-325, 357.  
SONG Zhi-long, LYU Bing-hai, KE Ming-feng, et al. Removal Rate Model of Deterministic Shear Thickening Polishing Material Based on BP Neural Network[J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 320-325, 357.
- [23] 李敏, 袁巨龙, 吕冰海, 等.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷的剪切增稠抛光[J]. 机械工程学报, 2017, 53(9): 193-200.  
LI Min, YUAN Ju-long, LÜ Bing-hai, et al. Shear-Thickening Polishing of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  Ceramics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(9): 193-200.
- [24] 陈士豪, 吕冰海, 贺乾坤, 等. 圆柱曲面剪切增稠抛光材料去除函数仿真与实验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 355-362.  
CHEN Shi-hao, LYU Bing-hai, HE Qian-kun, et al. Simulation and Experimental Study on Material Removal Function of Shear Thickening Polishing Cylindrical Surface[J]. Surface Technology, 2019, 48(10): 355-362.
- [25] NALBANT M, GÖKKAYA H, SUR G. Application of Taguchi Method in the Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Turning[J]. Materials and Design, 2006, 28(4): 1379-1385.
- [26] YANG W H, TARN Y S. Design Optimization of Cutting Parameters for Turning Operations Based on the Taguchi Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 84(1-3): 122-129.