

# 圆柱曲面剪切增稠抛光材料去除函数 仿真与实验研究

陈士豪, 吕冰海, 贺乾坤, 杨易彬, 邵琦, 宋志龙, 袁巨龙

(浙江工业大学 超精密加工研究中心, 杭州 310014)

**摘要:** **目的** 通过有限元仿真方法获得圆柱曲面周围压强场和速度场的分布, 结合实验结果拟合得到修正系数, 从而建立圆柱曲面剪切增稠抛光 (STP) 的材料去除函数。**方法** 运用计算流体动力学仿真软件 CFX, 对圆柱曲面 STP 过程的抛光液流动进行仿真, 通过对比工件所受作用力的仿真值与实验测量值, 求得流体流变特性修正系数  $K_v$ , 再根据仿真得到的圆柱曲面表面压强场和抛光液速度场, 基于 Preston 方程建立圆柱曲面 STP 的材料去除函数。以不锈钢 316 圆柱曲面为抛光实验对象, 通过去除率测量结果拟合得到材料去除函数系数。**结果** 计算得出流体流变特性修正系数  $K_v=40.1$ , 修正后, 仿真模型的压力输出值与实验测量值的误差为 4.7%。计算得到 Preston 方程去除函数的方程系数  $K_c=28.85$ 。材料去除函数在整个圆柱曲面呈现近似正弦函数的分布规律, 与抛光速度呈指数函数关系。抛光仿真和实验结果有着较好的吻合, 误差在 5% 以内, 表明了仿真模型的有效性。**结论** 通过 CFX 仿真, 可以很好地揭示剪切增稠抛光过程中圆柱曲面表面压强场和速度场的分布规律, 并基于 Preston 方程建立材料去除函数, 这种剪切增稠抛光去除函数的建立方法, 不仅仅适用于规则的圆柱体, 也适合其他形状工件剪切增稠抛光去除函数的建立。

**关键词:** 圆柱曲面; 剪切增稠抛光; 有限元仿真; 去除函数; 316L 不锈钢

**中图分类号:** TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)10-0355-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.044

## Simulation and Experimental Study on Material Removal Function of Shear Thickening Polishing Cylindrical Surface

CHEN Shi-hao, LYU Bing-hai, HE Qian-kun, YANG Yi-bin,  
SHAO Qi, SONG Zhi-long, YUAN Ju-long

(Ultra-precision Machining Center, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to obtain the distribution of pressure field and velocity field around cylindrical surface by finite element simulation method, to establish the material removal function of cylindrical shear thickening polishing in combination with the correction coefficient obtained by fitting the experimental results. The computational fluid dynamics simulation software CFX was used to simulate the flow of the polishing liquid in the shearing thickening process of cylindrical curved surface. By comparing the simulated value and experimental measurement value of the force applied to the workpiece, the fluid

收稿日期: 2019-02-20; 修订日期: 2019-08-03

Received: 2019-02-20; Revised: 2019-08-03

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LR17E050002); 国家自然科学基金 (51175166)

Fund: Supported by Zhejiang Natural Science Foundation (LR17E050002), National Natural Science Foundation of China (51175166)

作者简介: 陈士豪 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向超精密加工技术。

Biography: CHEN Shi-hao (1994—), Male, Master, Research focus: ultra-precision 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加工技术。邮箱: icewater7812@126.com

Corresponding author: LYU Bing-hai (1978—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: ultra-precision machining technology. E-mail: icewater7812@126.com

rheological property correction coefficient  $K_v$  was obtained. Based on the simulated surface pressure field and polishing fluid velocity field, the material removal function of shear thickening polishing cylindrical curved was established based on Preston equation. With stainless steel 316 curved cylinder as the target of polishing experiment, the material removal function was obtained based on the measurement result of removal rate. The result showed that the fluid rheological property correction coefficient  $K_v=40.1$ , the error of the pressure output value of the modified model and the experimental measurement after correction was 4.7%, the equation coefficient of the Preston equation removal function was calculated to be  $K_c=28.85$ , the material removal function presents a distribution law of approximate sinusoidal function throughout the cylindrical surface and was exponentially related to the polishing speed. The polishing simulation and experimental results were in good agreement, and the error was within 5%, indicating the effectiveness of the simulation model. The distribution law of pressure field and velocity field on the surface of cylindrical curved surface during shear thickening polishing can be well revealed by CFX simulation. The material removal function established based on Preston equation. And the establishment of this shear thickening polishing removal function is not only applicable to regular cylinders, but also suitable for the establishment of shear thickening polishing removal function for other shape workpieces.

**KEY WORDS:** cylindrical surface; shear thickening polishing; finite element simulation; removal function; 316L stainless steel

抛光技术是降低表面粗糙度, 获得无损伤、光滑表面的最终加工手段, 是超精密加工的一种主要加工方法<sup>[1-2]</sup>。随着天文、航空航天、汽车零部件等领域的快速发展, 复杂曲面已经成为众多工业产品及零件的重要工作面<sup>[3]</sup>。目前, 先进的抛光方法包括: 水射流抛光<sup>[4]</sup>、电解抛光<sup>[5]</sup>、化学机械抛光<sup>[6]</sup>、激光抛光<sup>[7]</sup>、磁流变抛光<sup>[8]</sup>、等离子体抛光<sup>[9]</sup>等。目前, 对于曲面的抛光方法虽然有所成效, 但都存在着诸多问题。比如磁流变液配制复杂、成本高, 而且需要一套复杂的磁场辅助装置; 气囊抛光由于是点接触或小区域面接触, 需要高精度、高刚度的机械系统和复杂的控制系统。基于这些问题, 剪切增稠抛光<sup>[10]</sup> (Shear Thickening Polishing, STP) 作为一种新型的抛光方法被提出, 其利用抛光液的剪切增稠特性, 实现对工件的抛光<sup>[11]</sup>。由于剪切增稠抛光液具有很好的流动特性, 因此其形成的柔性“固着磨具”, 可以与不同曲率的曲面都保持良好的吻合度, 从而能用于复杂曲面的抛光<sup>[12]</sup>; 并且剪切增稠抛光液容易配制, 加之其特有的性质, 抛光过程中对设备的要求很低。由于复杂曲面曲率的多变性, 研究材料去除函数对控制表面质量和形状精度的影响, 对提高加工效率具有重要作用。

本研究以圆柱曲面这一典型曲面作为仿真和抛光对象, 旨在研究抛光过程中其表面去除函数的分布, 并为其他曲面剪切增稠抛光去除函数提供依据。圆柱曲面剪切增稠抛光过程中, 抛光液的流动基本属于圆柱绕流。由于剪切增稠抛光液特殊的非线性流变特性, 以及圆柱绕流复杂的流动状态, 很难用本构方程推导得到压强场和速度场。流体有限元仿真技术的发展为解决这一问题提供了有效手段。例如, 詹昊等<sup>[13]</sup>运用 Fluent 研究了不同雷诺数下圆柱绕流的仿真计算。崔宜梁等<sup>[14]</sup>运用  $k-\varepsilon$  模型对三维圆柱绕流进行仿真分析。本文初次运用 CFX 仿真, 确定剪切增稠抛光圆柱曲面中, 流体对工件压力和速度的大小及其分布的影响, 并结合实验结果, 运用 Preston 方程建立

圆柱曲面的材料去除函数。

## 1 剪切增稠抛光原理与抛光液流变特性

STP 加工圆柱工件原理如图 1 所示, 以剪切增稠流体作为基液, 配制抛光液, 将抛光用的磨粒分散在剪切增稠流体中。抛光过程中, 由于工件与抛光液的相对运动, 抛光液与工件接触部分受到剪切作用, 发生剪切增稠现象, 抛光液中分散的固态胶体粒子聚合成大量粒子簇, 并将磨粒包裹在其中<sup>[15]</sup>; 接触区域抛光液的黏度急剧增大, 瞬间呈现固体特性, 增强了对磨粒的把持力, 在加工位置形成柔性“固着磨具”; 在柔性“固着磨具”与工件之间的接触力作用下, 通过磨粒的微切削作用, 实现对工件材料的高效、柔性加工<sup>[16]</sup>。

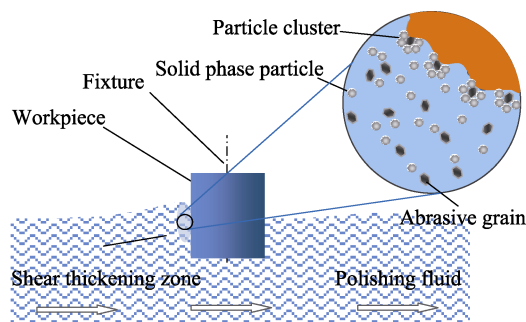


图 1 圆柱曲面剪切增稠抛光原理示意图  
Fig.1 Schematic illustration of STP principle

本研究所使用的剪切增稠 STP 抛光液为以  $Al_2O_3$  (密度为  $3.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) 作为磨料, 混入含有固相粒子 (平均粒径约  $11 \mu\text{m}$ ) 的 STF 基液, 并加入适量的分散剂制备而成<sup>[17]</sup>。在  $25^\circ\text{C}$  恒温下, 用 AR-G2 型应力控制流变仪测量抛光液的流变性能, 测量 3 次, 并取平均值, 以修正测量误差。得到的剪切增稠抛光液流变曲线如图 2 所示。由图可知, 随着剪切速率的增

加,黏度的变化分为三个区域:区域 I 为剪切变稀阶段;区域 II 为剪切增稠阶段,也是剪切增稠抛光中所运用的剪切速率阶段;区域 III 为黏度骤降阶段,是由于剪切速率过高,抛光液再次进入剪切变稀阶段所造成的。

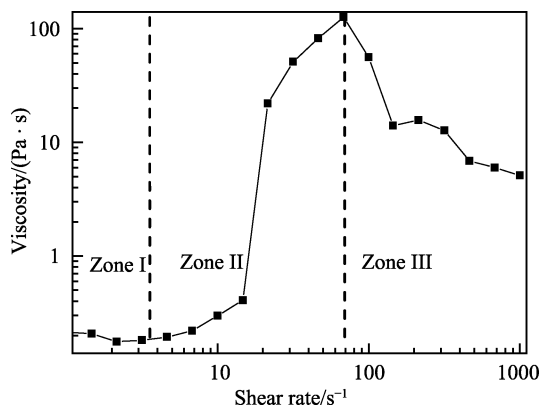


图 2 剪切增稠抛光液流变曲线  
Fig.2 Viscosity curve of STF

## 2 剪切增稠抛光圆柱流体仿真

剪切增稠抛光过程中,工件加工区域表面形成压力分布及抛光液的流动速度,对工件材料去除率和表面质量起着非常重要的作用。采用计算流体动力学分析软件 CFX,对圆柱曲面 STP 过程中,抛光液压力和速度的大小及其分布进行仿真分析,通过对比工件表面压力仿真值和实验测量值,得到流变特性的修正系数  $K_v$ 。利用修正后的抛光液特性进行仿真,得到工件表面压强和速度分布,并基于 Preston 方程,得到材料去除函数方程,再通过实验数据,拟合得到去除函数方程系数,最终建立圆柱曲面剪切增稠抛光去除函数。

### 2.1 建立仿真模型

在 ANSYS 中建立的实体模型如图 3 所示,工件为  $\phi 20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  的 316L 不锈钢圆柱体,流体从左向右流动。考虑到工件附近区域流体黏度、剪切速度、压力等参数变化梯度较大,故划分网格时将工件附近区域网格细化,如图 4 所示。

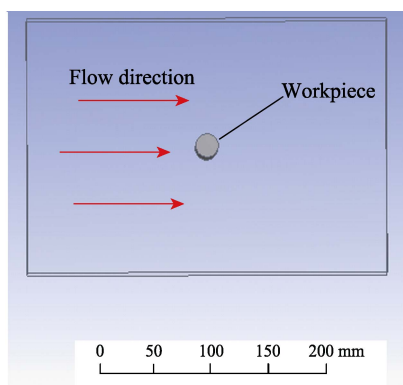


图 3 仿真模型的建立  
Fig.3 Establishment of simulation model

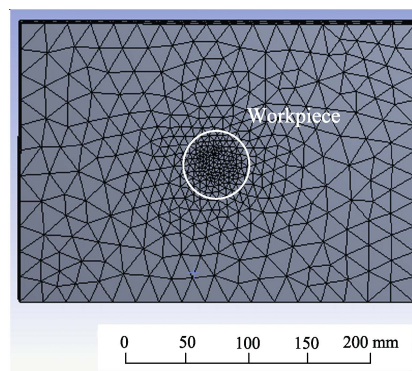


图 4 仿真模型网格的划分  
Fig.4 Mesh division of simulation model

### 2.2 剪切增稠流体特性和边界条件设置

流体材料属性设置是仿真的关键。首先根据抛光液流变曲线 (如图 2 所示),对仿真模型中的流体属性进行初始设置,通过对比工作表面作用力 (面向抛光液流动方向的正面压力) 的仿真值与实验值,计算流变曲线修正系数,以提高仿真模型的有效性。考虑到圆柱绕流中的湍流漩涡,流体模型选用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型,当流体入口速度设置为  $1.47 \text{ m/s}$  (抛光槽直径  $\phi 400 \text{ mm}$ 、抛光盘转速  $70 \text{ r/min}$ ) 时,仿真结果中输出的正压力为  $0.528 \text{ N}$ 。抛光实验设备如图 5 所示,抛光槽带动抛光液转动,工件表面受到抛光液的压力  $F$  由压力传感器测量得到。测力装置示意图如图 6 所示,选用 S 型压力传感器,夹具和压力传感器之间采用点接触,通过力矩计算得到工件所受压力。不同抛光速度下测得的正压力及拟合曲线如图 7 所示。随抛光槽转速增加,压力曲线呈指数形式增加,得到的拟合方程如式 (1) 所示。

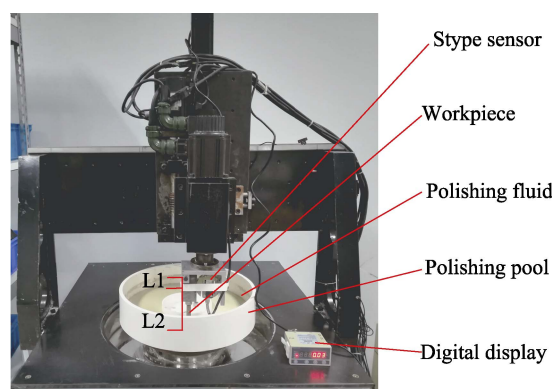


图 5 剪切增稠抛光实验设备  
Fig.5 Experimental device of STP

$$F = -40.80767 + 63.12753e^{(-0.5((\omega - 88.27715)/93.67807)^2)} \quad (1)$$

式中,  $F$  为正压力,  $\omega$  为抛光盘转速。在抛光槽  $60$ 、 $70$ 、 $80 \text{ r/min}$  转速下,工件所受正压力分别为  $19.51$ 、 $21.13$ 、 $22.07 \text{ N}$ ,仿真输出工件所受正压力分别为  $0.487$ 、 $0.528$ 、 $0.549 \text{ N}$ 。将测量正压力和仿真正压力数据运用 Origin 中最小二乘法进行拟合,得到抛

光液特性仿真修整系数  $K_v=40.1$ 。将  $K_v$  乘以图 2 的流变曲线,得到修正后的流变曲线方程,采用修正后的流变曲线在仿真模型中进行重新设置,输出不同抛光速度下的仿真压力。与拟合曲线进行对比,运用 Origin 误差计算工具,得到误差范围在 4.7% 以内(如图 7 所示),表明仿真模型的参数设置是有效的。

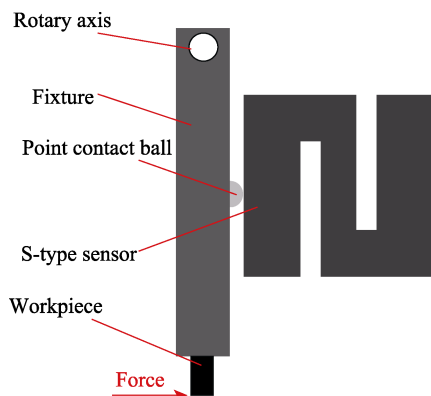


图 6 测力实验示意图

Fig.6 Schematic diagram of force test experiment

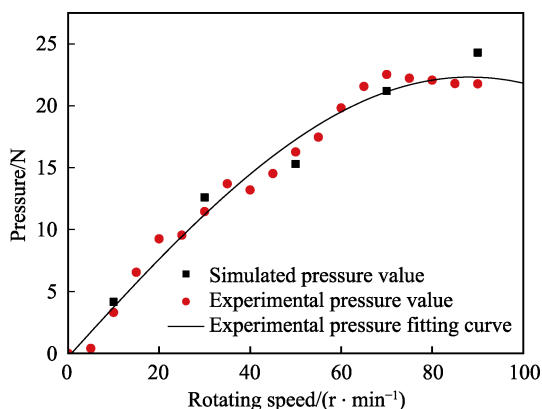


图 7 仿真值和实验曲线对比图

Fig.7 Comparison of simulated and experimental curves

## 2.3 圆柱曲面剪切增稠抛光材料去除函数的建立

抛光加工过程中,普遍采用 Preston 方程表达材料去除率与抛光参数之间的关系:

$$MRR = K_c PV \quad (2)$$

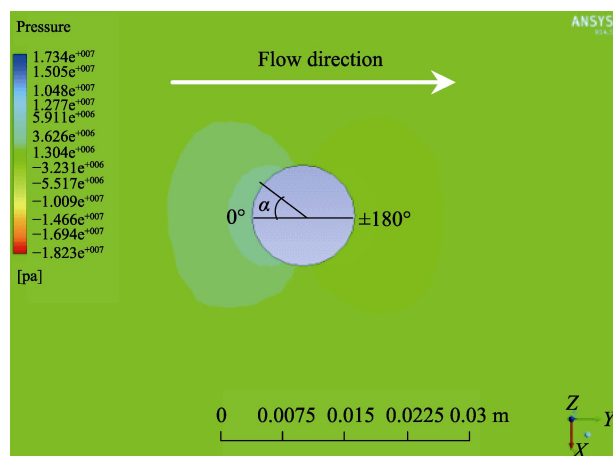
式中,  $MRR$  为材料去除率,  $P$  为抛光压强,  $V$  为抛光速度,  $K_c$  为常数。为得到圆柱曲面上不同位置的材料去除率,首先要获得圆柱曲面上不同位置的压强和速度分布,这里通过仿真获得,仿真条件设置如表 1 所示。

仿真得到的压强云图和速度云图分别如图 8a、b 所示。以正对流体流动方向取值为  $0^\circ$ , 顺时针为正, 逆时针为负, 分别取  $\alpha$  角等于  $0^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 、 $\pm 120^\circ$ 、 $\pm 150^\circ$ 、 $\pm 180^\circ$  的压强值和速度值, 并对结果进行拟合, 如图 9a、b 所示。压强的拟合公式如式(3)

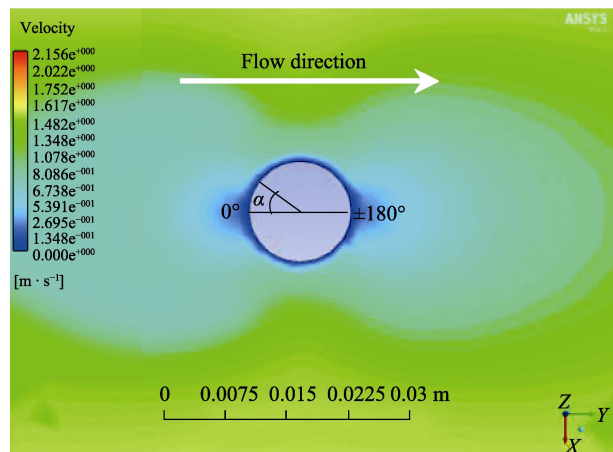
所示,速度的拟合公式如式(4)所示。将压强和速度代入公式(2),得出在抛光液流速为 1.47 m/s(抛光槽转速 70 r/min)条件下,圆柱曲面在圆周不同位置上的材料去除率分布如公式(5)所示,去除率呈现类似正弦函数的分布。

表 1 仿真条件设置  
Tab.1 Setting of simulation conditions

Simulation condition	Value
Workpiece size/mm	20×30
Inlet velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	1.47
Correction coefficient of rheological property( $K_v$ )	40.1
Output	$P$ 、 $V$



a 压强



b 速度

图 8 仿真结果云图

Fig.8 Cloud map of simulation result: a) pressure; b) speed

$$P = 0.35 + 2.16 \sin(\pi(\alpha + 85.02)/170.03) \quad (3)$$

$$V = 0.32 + 0.32 \sin(\pi(\alpha - 50.97)/101.94) \quad (4)$$

$$MRR = K_c PV = K_c (0.35 + 2.16 \sin(\pi(\alpha + 85.02)/170.03)) \cdot (0.32 + 0.32 \sin(\pi(\alpha - 50.97)/101.94)) \quad (5)$$



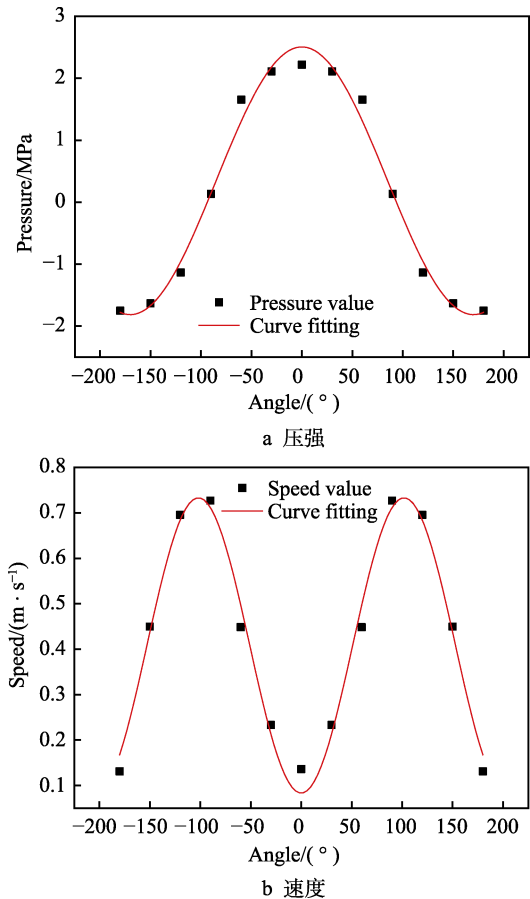


图 9 仿真压强和速度拟合曲线  
Fig.9 Simulation fitting curve: a) pressure; b) speed

### 3 抛光实验

#### 3.1 实验条件

为了确定去除函数系数  $K_c$  及验证仿真所得去除函数的正确性,对 316L 不锈钢圆柱滚子( $\phi 20\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ )进行抛光,具体的实验条件如表 2 所示(工艺参数与仿真条件相同)。实验中为得到工件材料的去除率,加工前在工件圆周的  $0^\circ,\pm 30^\circ,\pm 60^\circ,\pm 90^\circ,\pm 120^\circ,\pm 150^\circ,\pm 180^\circ$ 处用金刚笔划下一条划痕,如图 10 所示。

表 2 实验条件  
Tab.2 Experimental condition

Experimental condition	Value
Workpiece	316L cylindrical roller (20 mm×30 mm)
Abrasive	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Abrasive size	3000#
Concentration/%	10
Polishing fluid viscosity/(Pa·s)	Viscosity curve of Fig.2
Rotational speed/(r·min <sup>-1</sup> )	70
Time/min	30

采用白光干涉仪 (SuperView W1) 拍下划痕的深度  $H1$ ; 加工 30 min 后,再次用白光干涉仪拍下划痕的深度  $H2$ 。两次深度相减,即得出加工 30 min 的工件材料去除量,用以计算材料去除率。

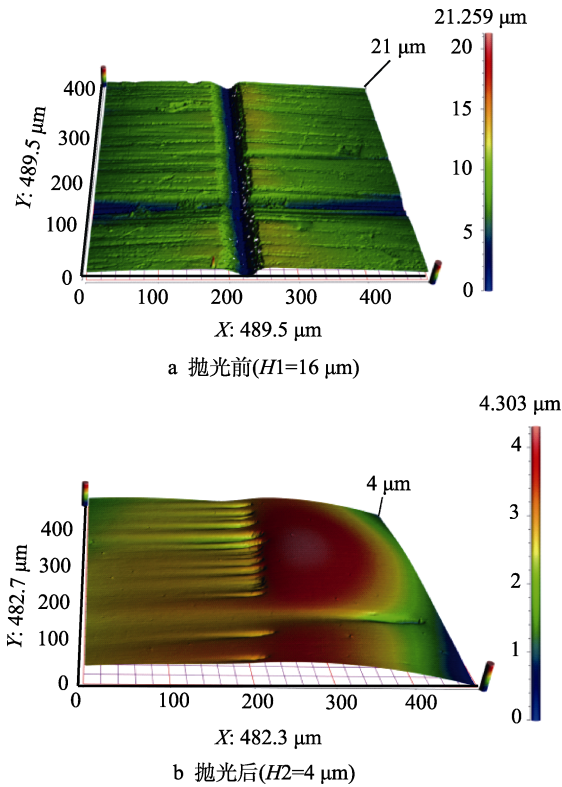


图 10 抛光前后标记划痕 3D 形貌图  
Fig.10 3D topography of scratch marks: a) before polishing ( $H1=16\text{ }\mu\text{m}$ ); b) after polishing ( $H2=4\text{ }\mu\text{m}$ )

#### 3.2 实验结果

抛光 30 min 后,圆柱曲面粗糙度  $Ra$  由  $121.421\text{ nm}$  降低到  $2.589\text{ nm}$ ,图 11 所示为加工前后工件的实物对比图。图 12 为用光学 3D 表面轮廓仪 SuperView W1 检测得到的抛光前后的不锈钢滚子表面 3D 形貌图。

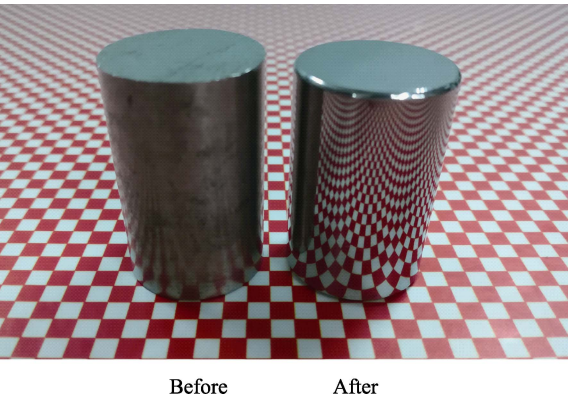


图 11 316L 加工前后实物对比图  
Fig.11 316L roller before and after processing

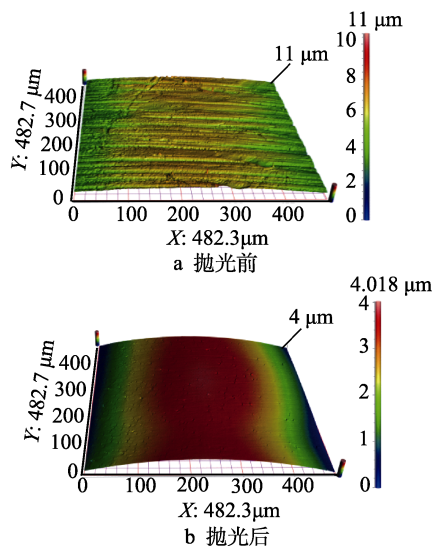


图12 抛光前后3D形貌图

Fig.12 3D topography before (a) and after (b) polishing

表3 工件材料实验及理论去除率

Tab.3 Experimental and theoretical removal rate of workpiece materials

Angle/(°)	-180	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150
Experimental removal rate/( $\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ )	0	0	0	1.77	15.64	7.73	0	8.59	17.14	1.82	0	0
Theoretical removal rate/( $\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ )	0	0	0	0.064	0.543	0.259	0	0.297	0.568	0.065	0	0

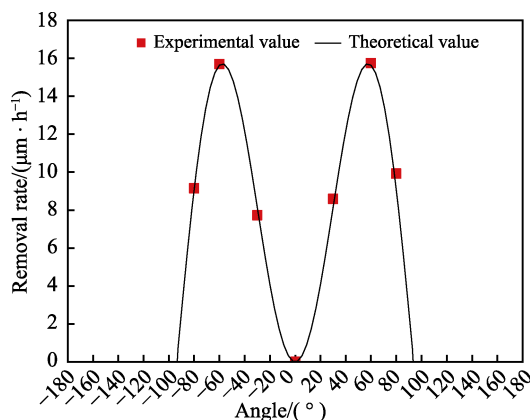


图13 去除函数实验和理论对比图

Fig.13 Removal function experiment and theoretical comparison

为了进一步探讨圆柱曲面上某一定点的去除率和抛光液转速的关系,取60°和-30°两点进行分析。两点速度和压力的仿真值和拟合曲线分别如图14和图15所示。在60°位置,通过拟合得到压力和速度与抛光转速的关系式分别如公式(7)和公式(8)所示;在-30°位置,通过拟合得到压力和速度与抛光转速的关系式分别如公式(9)和公式(10)所示。

$$P = -0.09406 + 2.59611e^{(-0.5((\omega-100.10997)/33.22677)^2)} \quad (7)$$

$$V = 0.06523 + 0.94014e^{(-0.5((\omega-98.62337)/29.00185)^2)} \quad (8)$$

$$P = -0.6283 + 3.16589e^{(-0.5((\omega-89.96585)/41.41774)^2)} \quad (9)$$

$$V = 0.01094 + 0.55736e^{(-0.5((\omega-90.47669)/26.45849)^2)} \quad (10)$$

根据 Preston 方程,可以得到在60°和-30°位置处的

### 3.3 分析与讨论

根据实验所得的圆周上不同角度的去除率与理论值如表3所示。运用最小二乘法,求得去除函数方程系数  $K_c=28.85$ ,将  $K_c$  代入公式(5),得到圆柱圆周上的去除函数,如公式(6)所示。当  $-93.7 < \alpha < 93.7$  时,去除函数满足近似正弦函数的分布,当  $\alpha$  超出该范围时,由于工件表面流体压力呈现负压状态,去除率为0。为了验证去除函数的正确性,将实际加工中工件圆周上不同位置的去除率与去除函数的理论值进行对比,运用 Origin 误差计算工具得到的误差范围在5%以内,表明所建立的去除函数具有较高的正确性,如图13所示。

$$MRR = \begin{cases} 28.85(0.35 + 2.16\sin(\pi(\alpha + 85.02)/170.03)) \\ (0.32 + 0.32\sin(\pi(\alpha - 50.97)/101.94)) \\ (-93.7 < \alpha < 93.7) \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

去除函数,去除函数分别如公式(11)和公式(12)所示。

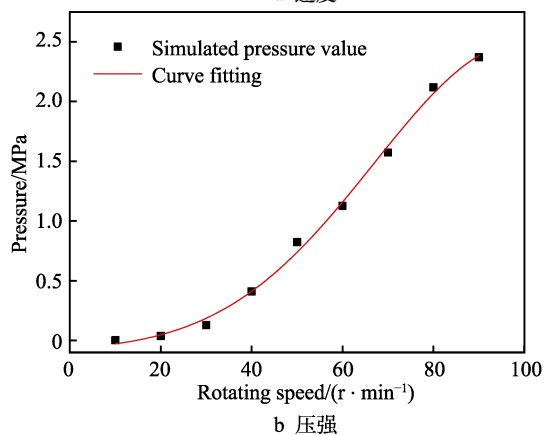
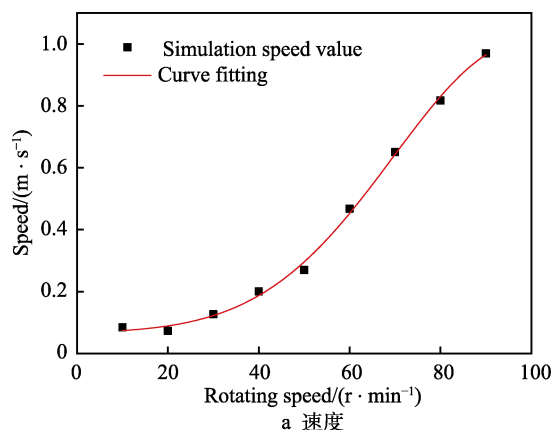


图14 60°位置速度和压强随转速的变化曲线

Fig.14 Speed (a) and pressure (b) varying with speed in position of 60°

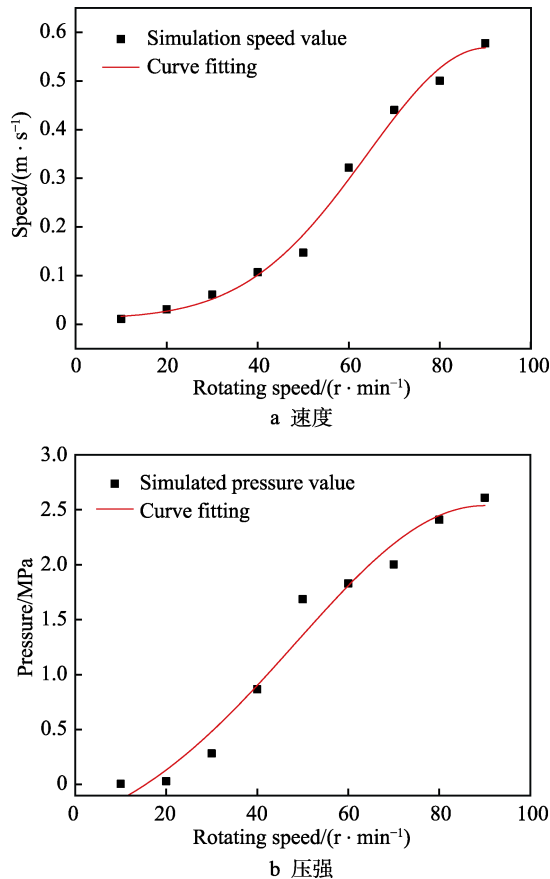


图 15  $-30^\circ$ 位置速度和压强随转速的变化曲线  
Fig.15 Speed (a) and pressure (b) varying with speed in position of  $-30^\circ$

$$\begin{aligned} \text{MRR}(60^\circ) = & 16.3848(-0.09406 + \\ & 2.59611e^{(-0.5((\omega-100.10997)/33.22677)^2)}) \cdot \\ & (0.06523 + 0.94014e^{(-0.5((\omega-98.62337)/29.00185)^2)}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{MRR}(-30^\circ) = & 8.3235(-0.6283 + \\ & 3.16589e^{(-0.5((\omega-89.96585)/41.41774)^2)}) \cdot \\ & (0.01094 + 0.55736e^{(-0.5((\omega-90.47669)/26.45849)^2)}) \end{aligned} \quad (12)$$

分别以速度 40、50、60、70、80 r/min 进行实验验证, 实验结果和仿真拟合曲线如图 16 所示, 运用

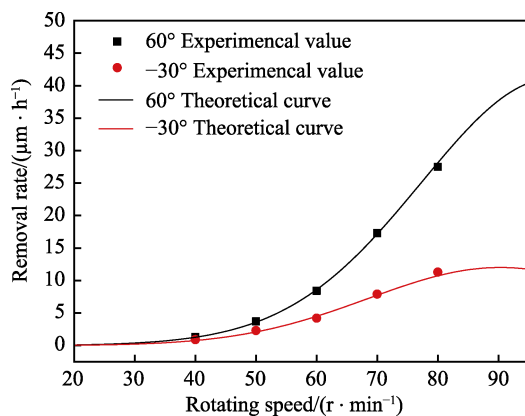


图 16 不同位置随转速的去除函数曲线及实验值  
Fig.16 Removal function curve and experimental value varying with rotation speed in different positions

Origin 误差计算工具得到其误差范围在 4.8%以内,  $60^\circ$  位置处的去除率高于  $-30^\circ$  位置处的去除率, 符合前文去除函数的特点, 并且两点去除函数的变化趋势基本一致, 都呈现近似指数函数的分布, 与抛光液剪切增稠区域的流变特性基本一致。

### 3.4 抛光效率的对比

为验证剪切增稠抛光高效性, 本研究将抛光过程中的材料去除率与抛光后表面粗糙度与传统方法进行了对比。对比实验采用双平面方式抛光圆柱曲面, 实验参数与结果均取自清华大学与浙江工业大学关于圆柱滚子抛光的合作项目<sup>[3]</sup>。

图 17a 给出了剪切增稠抛光方法与所对比的双平面抛光方法的材料去除率。图中 Lapping、Polishing1、Polishing2 分别指双平面加工中的研磨工艺、粗抛光工艺和精抛光工艺, STP 指剪切增稠抛光。明显可见, 本研究采用的剪切增稠抛光方法的材料去除率远高于对比对象抛光的材料去除率, 是研磨加工的 2 倍以上。图 17b 给出了加工后表面粗糙度的对比。对比方法初始的表面粗糙度平均值  $R_a$  为 76 nm 左右, 而本研究抛光的工件初始表面粗糙度平均值  $R_a$  是 125 nm。由图可见, 采用 STP 抛光后的表面粗糙度要比双平面方法结合化学机械抛光方法获得的表面粗糙度还

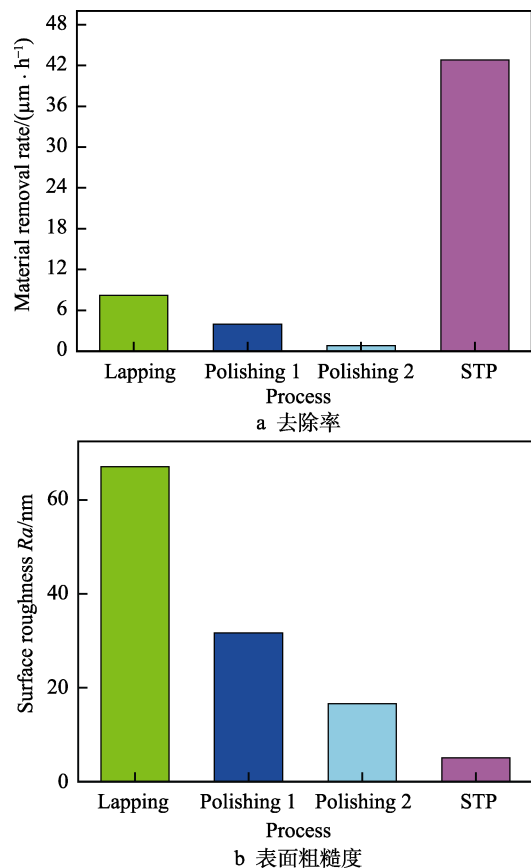


图 17 STP 与双平面加工抛光圆柱曲面的对比  
Fig.17 Comparison of STP and double-plane machining polished cylindrical surface: a) removal rate; b) surface roughness

要好。由此可见, STP 在抛光效率和抛光质量上都具有很大的潜在优势。

## 4 结论

1) 运用计算流体动力学仿真软件 CFX, 对圆柱曲面 STP 过程的抛光液流动进行仿真, 通过对比工件所受作用力的仿真值与实验测量值, 运用 Origin 拟合工具求得流体流变特性修正系数  $K_v=40.1$ 。

2) 根据仿真得到的圆柱曲面表面压强场和抛光液速度场, 基于 Preston 方程建立圆柱曲面 STP 的材料去除函数。仿真结果与实验结果有很高的一致性, 误差在 5% 以内, 表明仿真模型可以很好地揭示 STP 圆柱曲面去除函数的分布规律。

3) 在圆柱曲面圆周上  $-93.7 < \alpha < 93.7$  范围内, 去除函数呈现正弦函数的分布, 在其他范围内, 去除率为 0。在不同抛光速度下的去除函数呈现近似指数函数的分布, 与抛光液流变曲线区域 II 的变化趋势一致。

4) 通过仿真和实验对比, 修正剪切增稠黏度系数, 并用修正后的黏度曲线导入仿真模型, 得到工件周围压强场和速度场的分布, 运用 Preston 方程建立去除函数的分布, 这种建立去除函数的流程和方法, 不仅仅适用于规则的圆柱体, 也适合其他形状工件剪切增稠抛光去除函数的建立。

## 参考文献:

- [1] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.  
YUAN Ju-long, ZHANG Fei-hu, DAI Yi-fan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(15): 161-171.
- [2] 张巨帆, 王波, 董申. 超光滑表面加工方法的新进展[J]. 光学技术, 2007, 33(z1): 150-154.  
ZHANG Ju-fan, WANG Bo, DONG Shen. A new development of ultra-smooth surface machining technology[J]. Optical technique, 2007, 33(z1): 150-154.
- [3] 李敏, 袁巨龙, 吴喆, 等. 复杂曲面零件超精密加工方法的研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 178-191.  
LI Min, YUAN Ju-long, WU Zhe, et al. Progress in ultra-precision machining methods of complex curved parts[J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(5): 178-191.
- [4] 张文超, 武美萍. 磨料水射流抛光 45 钢工艺参数优化[J]. 机械设计与研究, 2017(6): 113-117.  
ZHANG Wen-chao, WU Mei-ping. Optimization of process parameters of abrasive water jet polishing 45 steel[J]. Machine design and research, 2017(6): 113-117.
- [5] 范丽霞, 李萌, 贾涓. 电解抛光法制备钛合金 EBSD 样品[J]. 物理测试, 2018, 36(1): 38-41.  
FAN Li-xia, LI Meng, JIA Juan. Preparation of titanium alloy samples via electro-polishing for EBSD analyzing[J]. Physics examination & testing, 2018, 36(1): 38-41.
- [6] 翟文杰, 高博. 单晶 SiC 的化学机械抛光及其增效技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(7): 7-16.  
ZHAI Wen-jie, GAO Bo. Research progress of chemical mechanical polishing and its efficiency-enhancement technology for single crystal silicon carbide[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(7): 7-16.
- [7] 王汕. 激光刻蚀抛光石英玻璃工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
WANG Shan. A study on laser etching and polishing quartz glasses technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [8] 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 磁流变抛光消除磨削亚表面损伤层新工艺[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 162-168.  
SHI Feng, DAI Yi-fan, PENG Xiao-qiang, et al. Removal of subsurface damage in grinding by magnet-rheological finishing[J]. Optics and precision engineering, 2010, 18(1): 162-168.
- [9] 张巨帆, 王波, 董申. 大气等离子体抛光技术在超光滑硅表面加工中的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1749-1755.  
ZHANG Ju-fan, WANG Bo, DONG Shen. Application of atmospheric pressure plasma polishing method in machining of silicon ultra-smooth surface[J]. Optics and precision engineering, 2007, 15(11): 1749-1755.
- [10] LI Min, LV Bing-hai, Yuan Ju-long, et al. Shear-thickening polishing method[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2015, 94: 88-99.
- [11] LI Min, LV Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Evolution and equivalent control law of surface roughness in shear-thickening polishing[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2016, 108: 113-126.
- [12] 李敏, 袁巨龙, 吕冰海, 等. 剪切增稠抛光加工  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015(9): 113-120.  
LI Min, YUAN Ju-long, LV Bing-hai, et al. Experimental investigation into  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics machined via shear-thickening polishing method[J]. Journal of South China University of Technology, 2015(9): 113-120.
- [13] 詹昊, 李万平, 方秦汉, 等. 不同雷诺数下圆柱绕流仿真计算[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(12): 129-132.  
ZHAN Hao, LI Wan-ping, FANG Qin-han, et al. Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at varies reynolds number[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(12): 129-132.
- [14] 崔宜梁, 王海峰, 李蒙, 等. 基于  $k-\varepsilon$  方法的三维圆柱绕流仿真分析[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2017, 30(1): 92-95.  
CUI Yi-liang, WANG Hai-feng, LI Meng, et al. Simulation of 3D cylinder flow by  $k-\varepsilon$  method[J]. Journal of Qingdao University (natural science edition), 2017, 30(1): 92-95.
- [15] 戴伟涛, 吕冰海, 翁海舟, 等. 圆柱表面声波辅助剪切增稠抛光优化实验研究[J]. 表面技术, 2016, 21(2): 188-193.  
DAI Wei-tao, LV Bing-hai, WENG Hai-zhou, et al. Optimization experiment of acoustic assisted shear thickening polishing of cylindrical surface[J]. Surface technology, 2016, 21(2): 188-193.
- [16] 李敏, 吕冰海, 袁巨龙, 等. 剪切增稠抛光的材料去除数学模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 143-151.  
LI Min, LV Bing-hai, YUAN Ju-long, et al. Material removal mathematics model of shear thickening polishing[J]. Journal of mechanical engineering, 2016, 52(7): 143-151.
- [17] 李敏, 袁巨龙, 吕冰海. 剪切增稠抛光磨料液的制备及其抛光特性[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2513-2521.  
LI Min, YUAN Ju-long, LV Bing-hai. Preparation of shear thickening polishing abrasive slurries and their polishing properties[J]. Optics and precision engineering, 2015, 23(9): 2513-2521.