

# 加工间隙对 CBN 磁性磨料研磨 904L 不锈钢表面完整性的影响

杜嘉静, 张桂香, 朱培鑫, 姜林志, 陈昊鑫, 刘宁

(山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255000)

**摘要:** **目的** 针对 904L 高性能不锈钢工件进行磁力光整加工试验研究, 分析加工间隙对不锈钢表面完整性的影响。**方法** 对不同加工间隙的磁感应强度进行了仿真与测试的对比分析, 在不同加工间隙下, 采用雾化法制备的新型 CBN/铁基球形磁性磨料对 904L 高性能不锈钢进行磁力研磨加工。利用手持粗糙度仪和精密电子天平对不同间隙下工件表面粗糙度和材料去除量进行测量与分析, 利用金相显微镜观察不同加工间隙下工件表面形貌不同变化情况, 利用应力测试仪检测不同间隙下工件表面残余应力变化情况, 利用润湿角测量仪对不同间隙下工件表面的亲疏水性效果进行观察与分析。**结果** 当加工间隙为 2.5 mm 时, CBN/铁基球形磁性磨料磁力光整加工 904L 不锈钢效果最好。工件表面粗糙度由研磨前的  $0.5\ \mu\text{m}$  下降至  $0.05\ \mu\text{m}$ , 5 min 内材料去除量可达 36 mg, 工件表面均匀, 划痕被完全去除, 同时没有凹坑的产生。工件表面的残余压应力由 127.8 MPa 增加到 318 MPa, 工件表面与液滴的润湿角由  $20^\circ$  增加至  $83^\circ$ , 疏水效果达到最好。**结论** 加工间隙对 CBN 磁性磨料磁力光整加工 904L 不锈钢表面完整性有很大影响, 当加工间隙为 2.5 mm 时, 工件表面粗糙度最低, 表面形貌光整均匀, 残余压应力变大, 工件的疲劳强度增强, 工件表面疏水性变好, 达到最佳研磨效果。

**关键词:** 加工间隙; CBN/铁基球形磁性磨料; 904L 高性能不锈钢; 磁力光整加工; 表面完整性

**中图分类号:** TG356.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)06-0338-09

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.06.038

## Influence of Machining Gap on Surface Integrity of 904L Stainless Steel Finished by CBN Magnetic Abrasive Particles

DU Jia-jing, ZHANG Gui-xiang, ZHU Pei-xin, JIANG Lin-zhi, CHEN Hao-xin, LIU Ning

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

**ABSTRACT:** The influence of the machining gap on the surface integrity of the 904L high-performance stainless steel

收稿日期: 2021-02-02; 修订日期: 2021-04-25

Received: 2021-02-02; Revised: 2021-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51675316)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51675316)

作者简介: 杜嘉静 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工。

Biography: DU Jia-jing (1996—), Female, Master, Research focus: precision machining.

通讯作者: 张桂香 (1964—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为精密加工。邮箱: zhanggx@sdut.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Gui-xiang (1964—), Female, Doctor, Professor, Research focus: precision machining. E-mail: zhanggx@sdut.edu.cn

引文格式: 杜嘉静, 张桂香, 朱培鑫, 等. 加工间隙对 CBN 磁性磨料研磨 904L 不锈钢表面完整性的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 338-346.

DU Jia-jing, ZHANG Gui-xiang, ZHU Pei-xin, et al. Influence of machining gap on surface integrity of 904L stainless steel finished by CBN magnetic abrasive particles[J]. Surface technology, 2021, 50(6): 338-346.

workpiece was analyzed by carrying out magnetic abrasive finishing experiment. The magnetic induction intensity of different machining gaps is compared and analyzed by simulation and testing. Under different machining gaps, the new CBN/Fe-based spherical magnetic abrasive particles prepared by the atomization method is used to finish 904L high-performance stainless steel. Use a hand-held roughness meter and a precision electronic balance to measure and analyze the surface roughness and material removal of the workpiece under different gaps. A metallographic microscope is used to observe the different changes in the surface morphology of the workpiece under different processing gaps. A stress tester is used to detect residual stress of different gaps. The wetting angle measuring instrument is used to observe and analyze the hydrophilic and hydrophobic effects of the surface of the workpiece under different gaps. When the machining gap is 2.5 mm, CBN/Fe-based spherical magnetic abrasive magnetic finishing is the best for 904L stainless steel. The surface roughness of the workpiece is reduced from 0.5  $\mu\text{m}$  before grinding to 0.05  $\mu\text{m}$ , and the material removal amount can reach 36 mg within 5 minutes. The surface of the workpiece is uniform, without scratches and pits. When the residual compressive stress on the surface of the workpiece increased from 127.8 MPa to 318 MPa, and the wetting angle between the surface of the workpiece and the droplet increased from 20° to 83°, and the hydrophobic effect is the best. The machining gap has a great influence on the surface integrity of 904L stainless steel processed by CBN magnetic abrasive magnetic finishing. When the machining gap is 2.5 mm, the surface roughness of the workpiece is the lowest, the surface morphology is uniform, the residual compressive stress becomes larger, and the workpiece is fatigued. The strength is enhanced, and the hydrophobicity of the surface of the workpiece becomes better, achieving the best grinding effect.

**KEY WORDS:** machining gap; CBN/Fe-based spherical magnetic abrasive particles; 904L high performance stainless steel; magnetic abrasive finishing process; surface integrity

904L 高性能不锈钢是一种含碳量极低的超级奥氏体不锈钢,通常能耐受 1400 °C 以上的温度,它本身具有很高的镍和铬含量,所以耐腐蚀性能特别好,是最先进的不锈钢材料,一般用于航天航空、石油石化、生物医疗等有极高表面质量要求的行业<sup>[1-4]</sup>。然而与普通材料相比,904L 不锈钢属于典型的难加工不锈钢。因为其具有更高的塑性和延伸率,所以在光整加工过程中工件表面的塑性变形大,磨削力也随着变大,在研磨过程中容易与磨具产生粘附现象。同时,904L 不锈钢的导热系数比较低,研磨时容易产生很多热量,过多的热量一方面可能会烧伤工件的表面,同时也会加速磨具的磨损,影响磨具的性能和寿命。因此,在光整加工 904L 不锈钢时,需要选取导热性和耐磨性较好、硬度较高而且与工件表面粘附性较小的磨具<sup>[5-7]</sup>。

相比于普通磨削,磁力研磨加工是属于一种柔性加工,与工件表面产生的粘附力较小,同时产生的加工热量较少,因此非常适用于 904L 不锈钢的加工<sup>[8-12]</sup>。在加工过程中,磁性磨料对提高产品的表面质量和性能起着非常重要的作用<sup>[13-15]</sup>。梁伟等<sup>[16]</sup>采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /铁基磁性磨料对  $\text{ZrO}_2$  陶瓷进行磁力研磨加工,加工后表面粗糙度由开始的 1.9  $\mu\text{m}$  下降至 0.4  $\mu\text{m}$ ,工件表面质量有明显改善。Singh 等<sup>[17]</sup>采用  $\text{SiC}$  磁性磨料对 Inconel 625 镍基合金进行化学辅助磁力研磨加工,分析了不同实验条件对材料去除率的影响。Kala 等<sup>[18]</sup>采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  磁性磨料对 202 不锈钢进行双盘磁力研磨加工,通过数学模型与研磨实验的对比,确定了表面粗糙度的百分比变化与不同加工条件的关系。Wu 等<sup>[19]</sup>

采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  磁性磨料对 SUS304 不锈钢进行低频交变磁场磁力光整加工,研究了磁极转速、电流频率等工艺参数对工件表面质量的影响。目前的磁性磨料多以  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiC}$  等普通硬度磨粒相为主,此类磨料磨粒相硬度较低,导热性较差,对于 904L 不锈钢材料的难加工性质,不能很好地满足磁力光整加工的要求。

而 CBN 具有高硬度、耐磨损以及很好的导热性能等特点,特别适合 904L 高性能不锈钢的磨削加工<sup>[20-23]</sup>。因此,本试验采用自主研发的 CBN/铁基球形复合磁性磨料对 904L 不锈钢工件表面进行磁力光整加工试验研究。研究过程中发现,在其他试验条件都不发生变化的情况下,磁极端面与工件表面不同的加工间隙会严重影响 904L 不锈钢工件的表面质量,因此关于加工间隙对 CBN 磁性磨料磁力光整加工 904L 不锈钢工件表面完整性的影响做了进一步的试验研究。

## 1 磁力光整加工研磨压力的产生

### 1.1 研磨压力的产生

在光整加工过程中,在磁场力的作用下磁性磨料形成一条条磁串,通过磁串之间的相互吸引形成柔性的磁力研磨刷,从而在工件表面形成一个向下的研磨总压力  $P$  (如图 1 所示),而这个研磨压力是磁性磨料在磁力光整加工工件时的主要作用力<sup>[24]</sup>。其中,研磨压力的计算公式为<sup>[25-26]</sup>:

$$P = \frac{\mu_0 H^2}{2} \left( 1 - \frac{1}{\mu_m} \right) \quad (1)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率;  $H$  为磁场强度;  $\mu_m$  为磁性磨料的相对磁导率。

如果单位体积内的磁性磨料数为  $N$ , 那么单个磁性磨料受到的研磨压力为:

$$P = \frac{\mu_0 H^2}{2N} \left( 1 - \frac{1}{\mu_m} \right) \quad (2)$$

其中  $H = B / \mu_0$ , 因此式(2)又可写为:

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0 N} \left( 1 - \frac{1}{\mu_m} \right) \quad (3)$$

式中:  $B$  为加工区域内的磁感应强度。

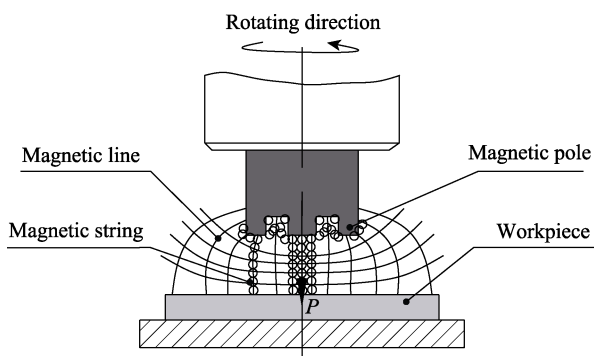


图1 研磨压力形成示意图

Fig.1 Schematic diagram of finishing pressure formation

从公式(3)中可知, 研磨总压力  $P$  与加工区域内的磁感应强度  $B$  的平方成正比, 与磁力研磨刷的相对磁导率成正相关关系, 即磁感应强度越强、磁性磨料的相对磁导率越高, 产生的研磨压力就越大。因此, 只有增大加工区域内磁感应强度或者在试验过程中采用相对磁导率较高的磁性磨料, 才能在工件表面产生比较大的研磨压力。在本次试验中, 磁性磨料种类及铁磁相与磨粒相的配比已经确定, 进而磁性磨料的相对磁导率也已经确定, 因此只能通过改变磁感应强度的大小来改变研磨压力。又因为本次试验采用的磁极为永磁极, 所以只有通过改变加工间隙的方式来改变加工区域内的磁感应强度<sup>[27]</sup>。

## 1.2 不同加工间隙磁场强度分析

为了检验不同加工间隙对加工区域磁感应强度的影响, 对自主研发的米字型开槽磁极(如图2所示)的磁感应强度进行仿真与测试的对比分析。利用COMSOL 磁感应强度仿真软件对磁极进行仿真分析, 结果如图3所示, 图中  $l$  为磁极长度,  $B$  为磁感应强度。从图3中可以看出, 加工区域内, 磁极的端面处磁感应强度最高, 磁感线最密集, 磁感应强度可以达到 0.6~0.8 T。距离磁极端面越远(加工间隙越大), 则磁感应强度越低, 磁感线也变得稀疏。同时, 利用磁通密度计对磁极进行磁感应强度测试(如图2所示)。以磁极端面为起点, 沿图2所示方向, 每隔 0.5 mm, 对加工区域内的磁感应强度进行一次测试,

共测量 10 次(加工间隙为 0~5 mm), 测试结果如图4所示。从图4中可以看出, 磁极端面处的磁感应强度最高可以达到 0.672 T, 距离磁极端面越远, 磁感应强度下降越快, 当加工间隙达到 5 mm 时, 磁感应强度迅速下降到 0.327 T。对比图3和图4可以看出, 利用磁通密度计测量的磁极不同加工间隙的磁感应强度结果与软件仿真值基本一致。说明通过改变磁极与工件之间的加工间隙可以改变加工区域内的磁感应强度, 从而改变磁力光整加工的研磨压力和效率, 起到改善工件表面质量的作用。

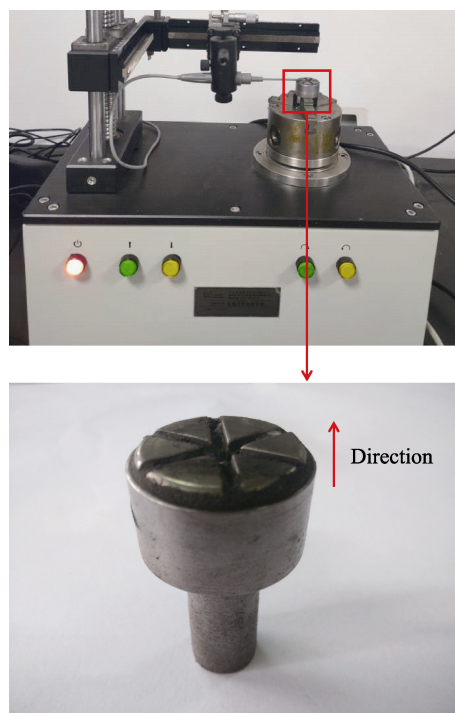


图2 磁极磁感应强度测试

Fig.2 Magnetic induction test of magnetic pole

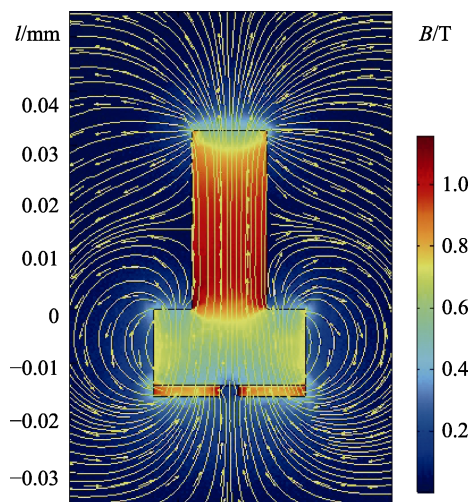


图3 磁极磁感应强度仿真图

Fig.3 Simulation diagram of magnetic induction of magnetic pole

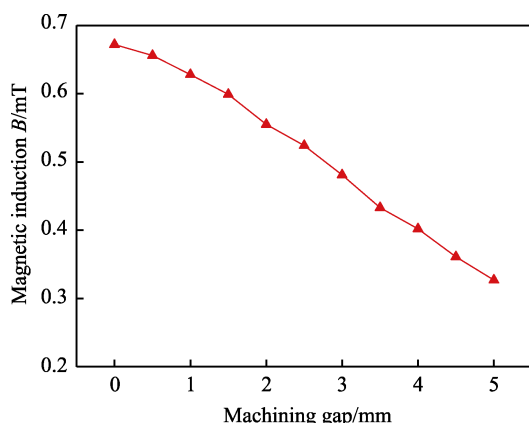


图 4 磁感应强度随加工间隙的变化

Fig.4 Variation of magnetic induction with machining gaps

## 2 试验材料与装置

### 2.1 试验材料

作为磁力光整加工过程中最重要的研磨工具,磁性磨料选择雾化法制备的新型 CBN/铁基球形磁性磨料。磁力光整加工的优点在于加工过程中磁性磨料的柔性和自适应性,因此理想的磁性磨料形状应该为球形,如图 5 所示,其中  $D$  为磁性磨料粒径,  $d$  为磨粒相粒径。而且球形磁性磨料的磨粒相在铁基体周围分布可以最大化且分布具有均匀一致的特征,因而在光整加工过程中具有较高的加工效率和较好的加工均匀性。试验所用磁性磨料为磨料粒径为 100~120 目 (147~121  $\mu\text{m}$ )、磨粒相粒径为 W7 (5~7  $\mu\text{m}$ ) 的 CBN/铁基球形磁性磨料 (如图 6 所示)。从图 6 中可以看出,雾化法制备的 CBN/铁基磁性磨料的球形度很高, CBN 磨粒相在铁基体周围分布均匀且密集,与理想的磁性磨料基本达到一致。

加工工件为 904L 高性能不锈钢,其成分 (以质量分数计) 为:铬 19%~23%,镍 23%~28%,钼 4%~5%,铜 1%~2%,铁为剩余成分。将一表面均匀的 904L 不锈钢板平均分割成 4 个完全相同的工件,工件尺寸为 70 mm×30 mm×2 mm,初始粗糙度大约为 0.5  $\mu\text{m}$ 。

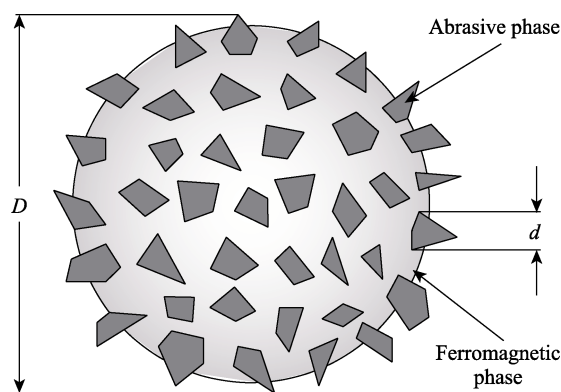


图 5 理想磁性磨料

Fig.5 Ideal magnetic abrasive particles

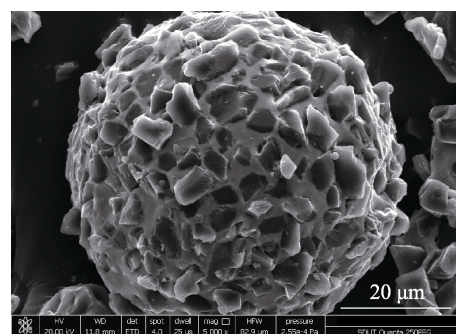


图 6 CBN/铁基球形磁性磨料

Fig.6 CBN/Fe-based spherical magnetic abrasive particles

### 2.2 试验装置及条件

磁力光整加工试验装置由 XK7136C 型数控机床改装而成,自主研发的钕铁硼开槽永磁极加装在机床主轴上 (如图 7 所示)。试验仅关于加工间隙这一单一因素对 CBN 磁性磨料磁力光整加工 904L 不锈钢的影响展开研究。试验采用的加工间隙依次从 3 mm 减少到 1.5 mm,期间每隔 0.5 mm 进行一次光整加工试验,试验共进行 4 次 (3、2.5、2、1.5 mm),每次研磨时间为 5 min。工件表面粗糙度、残余应力、表面形貌及亲疏水性的观察与检测位置如图 8 所示,为减少测量误差,每组数据测量 5 次并取平均值,试验具体工艺参数如表 1 所示。

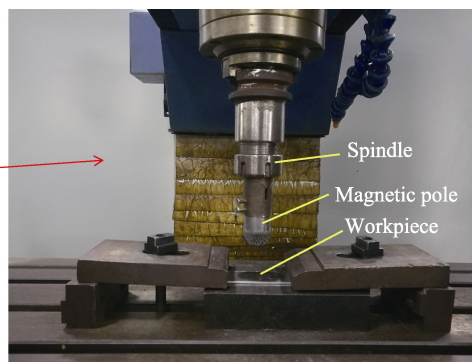
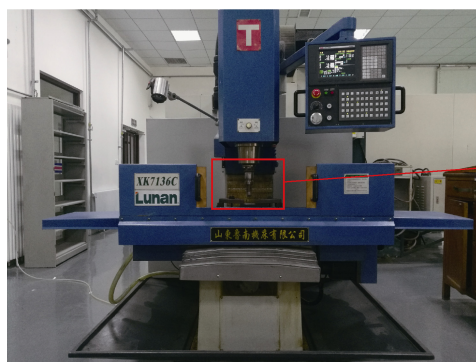


图 7 磁力光整加工装置

Fig.7 Magnetic abrasive finishing device



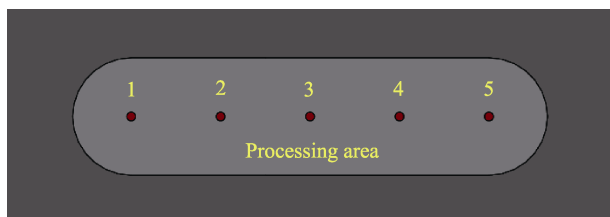


图8 工件表面的观察与测量点

Fig.8 Observation and measurement points of workpiece surface

表1 试验工艺参数

Tab.1 Test parameters

Parameters	Values
Workpiece	904L stainless steel
Magnetic pole	Nd-Fe-B permanent magnet
Magnetic abrasive particles	CBN/Fe-Based spherical magnetic abrasive particles (121~147 $\mu\text{m}$ )
Grinding fluid	Water based grinding fluid
Working gap/mm	3, 2.5, 2, 1.5
Magnetic pole rotational speed/( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	1500
Workpiece feed speed/( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	30
Finishing time/min	5, 5, 5, 5

试验过程中,利用手持粗糙度仪和精密电子天平对工件的表面粗糙度值和材料去除量进行精确测量。利用金相显微镜观察不同加工间隙下工件研磨前后的表面形貌变化。利用应力测试仪对不同加工间隙下工件表面加工前后的残余应力进行测定与分析。利用润湿角测量仪检测不同加工间隙下工件研磨前后亲疏水性的变化情况。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 加工间隙对工件表面粗糙度和材料去除量的影响

为了测试不同加工间隙对工件表面粗糙度以及材料去除量变化的影响,依次在3、2.5、2、1.5 mm间隙下,使用手持粗糙度仪测量工件表面粗糙度的变化情况,使用精密电子天平测量工件材料去除量以及变化趋势。每次试验均为5 min,每隔0.5 min取下测量一次工件表面粗糙度和材料去除量。工件表面粗糙度具体变化情况如图9所示,材料去除量如图10所示。

从图9和图10中可以看出,当加工间隙为3 mm时,工件表面粗糙度值下降缓慢,材料去除量基本上未发生变化;当加工间隙为2.5 mm时,工件表面粗糙度下降明显,材料去除量迅速增加,粗糙度最低可

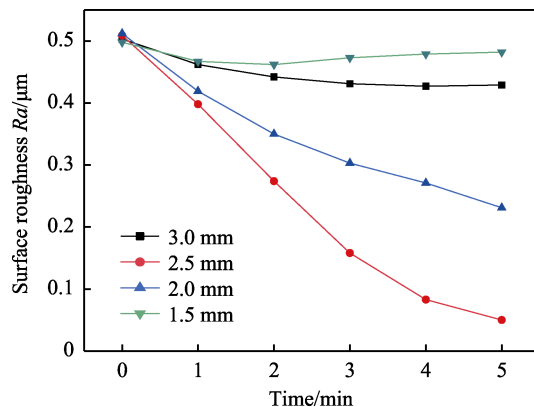


图9 表面粗糙度随加工间隙的变化

Fig.9 Variation of surface roughness with machining gaps

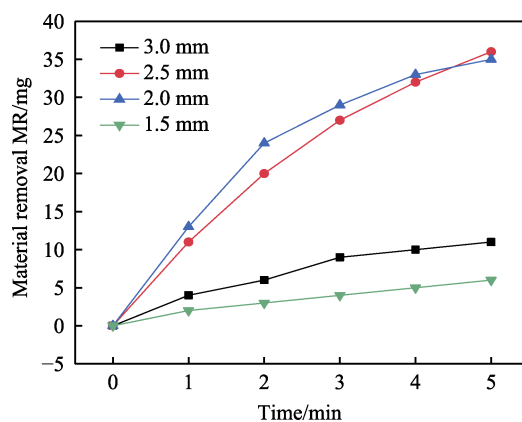


图10 材料去除量随加工间隙的变化

Fig.10 Variation of the amount of material removal with the machining gap

降至0.05  $\mu\text{m}$ ;当加工间隙缩短至2 mm时,粗糙度下降趋势变缓,但是材料去除量增加依旧明显,去除量最终可达35 mg。而当加工间隙缩短至1.5 mm时,工件表面粗糙度下降极为缓慢,加工一段时间后粗糙度值甚至有上升趋势,材料去除量增加趋势也明显变缓。这是因为当加工间隙过大时,大部分磁性磨料与工件表面未能发生接触或者只有少量接触(如图11a),少数与工件表面接触的磁性磨料也只与工件摩擦与挤压而不切削,在这种情况下,粗糙度下降缓慢,材料去除量很少,加工效率很低。当采用适当的加工间隙时,磁性磨料会与工件表面充分接触(如图11b),磁性磨料能够在工件表面上同时产生滑动和滚动,处于正常的微刃切削状态,而且形成的磁力研磨刷自适应性强,磨料的流动性好,替代更换更为突出,粗糙度下降快,材料去除量快速增加,最终达到的表面质量较好。而当加工间隙过小时,会造成磁性磨料与工件表面过度接触(如图11c),使磁性磨料在光整加工过程中柔性和自适应较差,同时大部分磁性磨料会被挤压到磁极外边缘,磨料不能有效地加工去除工件表面,最终使工件表面粗糙度较差,材料去除量较少。

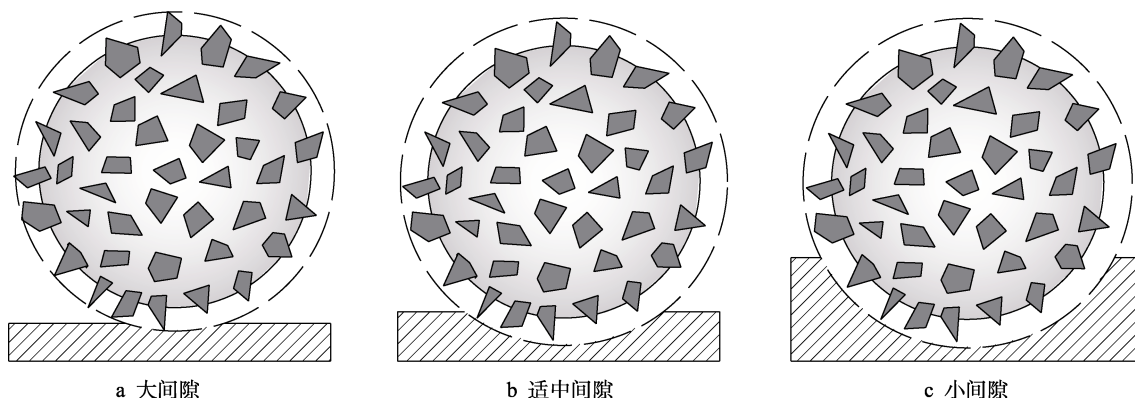


图 11 磁性磨料加工方式随加工间隙的变化

Fig.11 Variation of the magnetic abrasive processing method with the processing gaps: a) large gap, b) moderate gap, c) small gap

### 3.2 加工间隙对工件表面形貌的影响

采用 Axio Lab A 型金相显微镜观察不锈钢工件的表面形貌,不同加工间隙下的工件表面形貌如图 12 所示。研磨前,可以看到 904L 不锈钢工件表面有大量深浅不一的划痕存在(图 12a),这是工件在经过切削等粗加工时留下的划痕,但是基本没有凹坑存在。加工间隙为 3 mm 时,划痕开始变少变浅,但是仍有很多很深的划痕未能去除(图 12b),这是因为间隙不完全合适,研磨压力较小,材料去除量较少,只能将一些较浅的划痕优先去除。加工间隙减少至 2.5 mm 时,工件表面划痕基本完全去除,没有凹坑产生,表面完整性最好(图 12c)。此时加工间隙适中,磁力研磨刷达到最佳柔性状态,划痕可以有效去

除,同时工件表面不会留下凹坑。加工间隙降至 2 mm 时,可以看到工件表面有少量划痕和凹坑存在(图 12d),这是因为间隙偏小,研磨压力较大,部分磁性磨料开始翻滚困难,磁性磨料的研磨性能下降,使工件表面划痕不能完全被去除并产生少量新的划痕和凹坑。加工间隙最终下降至 1.5 mm 时,工件表面有大量划痕和凹坑存在(图 12e),甚至有的磁性磨料完全嵌入到凹坑中(图 12f),表面完整性极差。这是因为此时磁力研磨刷几乎成刚性,磁性磨料流动性很差,磨料深深嵌入到工件表层,加工性能急剧下降,不仅原始表面的划痕很难去除,长时间加工还会生成新的划痕和大量的凹坑,严重影响工件表面完整性。

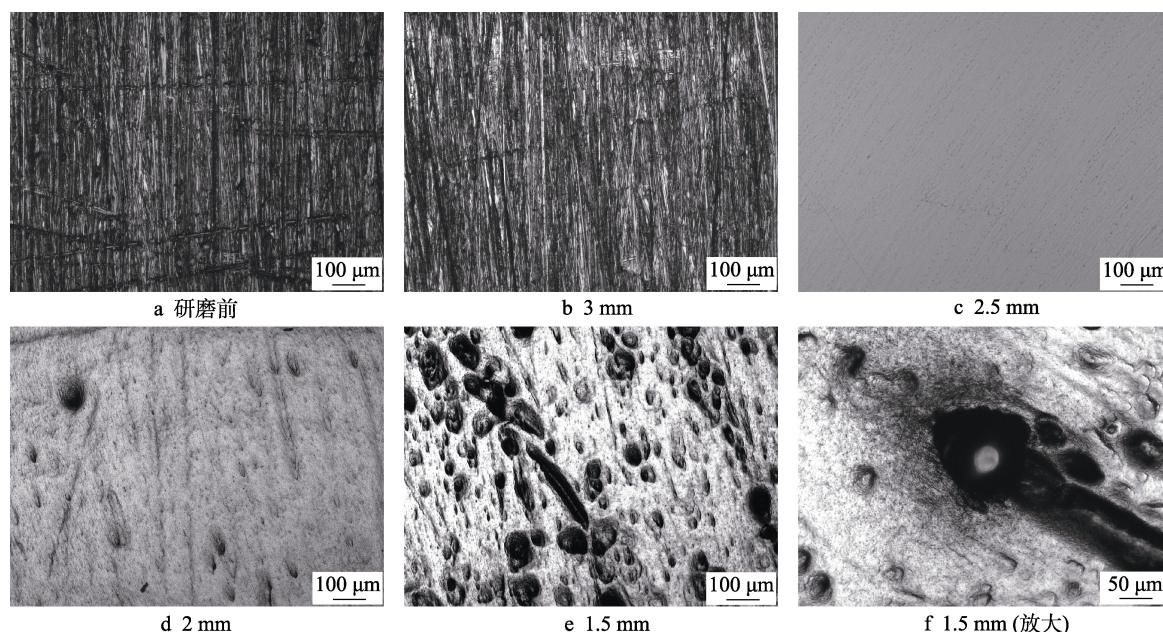


图 12 工件表面形貌随加工间隙的变化

Fig.12 Variation of the surface morphology of the workpiece with the machining gap: a) original

### 3.3 加工间隙对工件表面残余应力的影响

采用 Stresstech Xstress 3000 G2R 型 X 射线应力

分析仪对工件表面的残余应力进行测试,靶材为 Mn 靶,管电压为 30 kV,管电流为 6.6 mA,曝光时间为 3 s,测量方法为侧倾固定  $\psi$  法,倾斜角度  $\psi$  依次选

取  $0^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $-45^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 。不同加工间隙下的工件表面残余应力平均值如图 13 所示。在实际应用过程中,压应力的产生会很好地加强工件的抗蠕变与抗疲劳能力,从而提高工件的性能和疲劳寿命。研磨前,工件表面的平均残余压应力为 127.8 MPa。加工过程中,当加工间隙为 3 mm 时,工件的表面压应力变为 131.4 MPa。残余应力较加工前基本未发生变化,这是因为加工间隙较大时,工件受到研磨压力很小,工件表面应力基本保持不变。当加工间隙变为 2.5 mm 时,工件表面的压应力增加至 318 MPa。此时,加工间隙适中,研磨压力较大,工件表面发生塑性变形,经过磨料的反复挤压摩擦后,压应力大幅度提高,抗疲劳强度大大增加。当加工间隙减少至 2 mm 时,工件表面的压应力进一步增加至 375.2 MPa,这是因为间隙变小后研磨压力继续变大,压应力也随之变大。然而当加工间隙继续减少至 1.5 mm 时,工件表面的

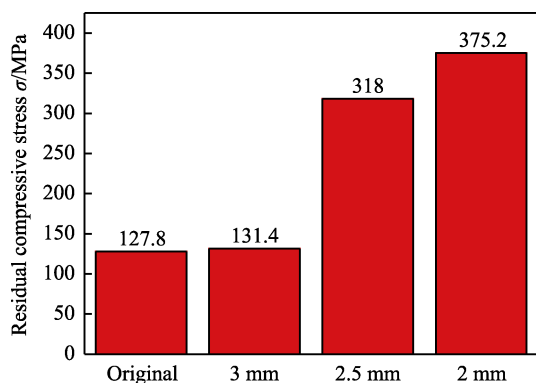


图 13 表面残余应力随加工间隙的变化

Fig.13 Variation of surface residual stress with machining gap

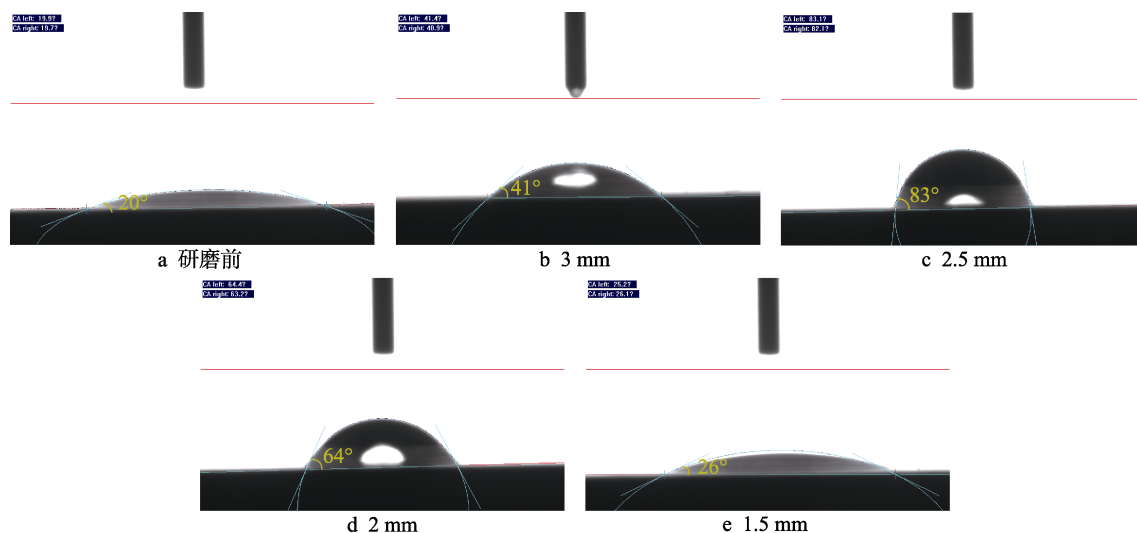


图 14 表面疏水性随加工间隙的变化

Fig.14 Variation of surface hydrophobicity with processing gap: a) original

残余压应力值起伏明显,不同地方的压应力值相差较大,最大值可达 307 MPa,最小值仅有 94 MPa。这是因为当加工间隙过小时,工件表面会形成大量凹坑,从而会出现应力集中现象,导致工件表面应力极不均匀,严重影响工件的性能和使用寿命。

### 3.4 加工间隙对工件表面亲疏水性的影响

不同加工间隙下的工件表面亲疏水性效果如图 14 所示。在航空航天、石油石化、生物医疗等长期处于苛刻环境中运行的关键设备来说,零件的亲疏水性尤为重要。一般来说,零件的疏水性越好,抗腐蚀性也就越好。液滴与工件的润湿角越小,工件的疏水性越差。研磨前 904L 不锈钢工件表面的润湿角平均值为  $20^\circ$  (图 14a),说明此时工件表面疏水性极差。因为加工前工件表面凹凸不平,划痕很多,液滴会很快渗入划痕之中。当加工间隙为 3 mm 时,研磨后工件表面的润湿角增大至  $41^\circ$  (图 14b),此时工件表面的疏水性有所好转。此时工件表面划痕变浅,液滴渗入划痕程度变浅。当加工间隙减少至 2.5 mm 时,工件表面的润湿角达到  $83^\circ$  (图 14c),工件表面疏水性最好。因为此时工件表面划痕基本消除,凹坑也未出现,此时工件表面完整性最好,疏水效果也最佳。当加工间隙继续减少至 2 mm 时,工件表面的润湿角又降至  $64^\circ$  (图 14d),工件表面的疏水性又开始变差,此时工件表面又开始出现划痕,并且开始产生少量凹坑。当加工间隙为 1.5 mm 时,工件表面润湿角降至  $26^\circ$  (图 14e)。因为此时工件表面划痕继续增多,而且开始出现大量凹坑,工件表面完整性很差,疏水性也变得很差。

## 4 结论

1) 通过雾化法制备的新型 CBN/铁基球形磁性磨

料对 904L 高性能不锈钢进行了磁力光整加工试验研究。在最佳试验条件下,解决了 904L 不锈钢难加工问题,提高了工件表面完整性,满足零件的使用需求。  
2) 对开槽磁极的磁场强度进行了仿真与测试的



对比分析,结果验证了在加工区域内,不同加工间隙下磁感应强度也有所不相同。加工间隙越小,加工区域内磁感应强度越强,研磨压力也越大。

3)在不同加工间隙下,对工件表面完整性进行了试验验证。结果发现,在本试验条件下,当加工间隙为2.5 mm时,工件表面粗糙度最低,表面完整性最好,产生较好的压应力,表面疏水性能最好,达到最佳光整加工效果。

## 参考文献:

- [1] 于明飞, 向嵩, 马国强, 等. 超级奥氏体不锈钢904L在高温高浓度硫酸中腐蚀行为[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(4): 85-92.  
YU Ming-fei, XIANG Song, MA Guo-qiang, et al. Corrosion behavior of super austenitic stainless steel 904L in high concentration sulfuric acid at high temperature[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2018, 39(4): 85-92.
- [2] 王绍尉, 黄德军, 李成涛, 等. 温度对904L不锈钢耐点蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(9): 689-692.  
WANG Shao-wei, HUANG De-jun, LI Cheng-tao, et al. Effect of temperature on pitting corrosion behavior of the 904L stainless steel[J]. Corrosion & protection, 2017, 38(9): 689-692.
- [3] MEGUID E A, REHIM S S, KIEY S A. Inhibitory effect of cetyltrimethyl ammonium bromide on the corrosion of 904L stainless steel in LiBr solution[J]. Corrosion engineering, science and technology, 2016, 51(6): 689.
- [4] 马国强. 高温浓硫酸溶液中 904L 腐蚀机理的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.  
MA Guo-qiang. Study on corrosion mechanism of 904L in high temperature concentrated sulfuric acid solution[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016.
- [5] 吴沁, 张建臣. 904L 不锈钢的高速铣削加工[J]. 现代制造工程, 2009(8): 78-80.  
WU Qin, ZHANG Jian-chen. The study for high-speed cutting tool system[J]. Modern manufacturing engineering, 2009(8): 78-80.
- [6] MAISTRO G, PÉREZ-GARCÍA S A, NORELL M, et al. Thermal decomposition of N-expanded austenite in 304L and 904L steels[J]. Surface engineering, 2017, 33(4): 564.
- [7] GENG Chang-jian, LIU Fang, TONG Wen-wei, et al. Experimental report on the nano-indentation testing of textured stainless steel 904L and 316L[J]. Procedia engineering, 2015, 99: 685.
- [8] 陈燕, 胡玉刚, 巫昌海, 等. 磁针磁力研磨去除涡轮轴内壁积碳[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 259-266.  
CHEN Yan, HU Yu-gang, WU Chang-hai, et al. Removal of carbon deposition on the inner wall of turbo shaft by magnetic needle grinding[J]. Surface technology, 2020, 49(6): 259-266.
- [9] 徐会, 康仁科, 刘冬冬, 等. 磁力研磨法去除航空发动机涡轮轴内表面积碳的试验分析[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 336-342.  
XU Hui, KANG Ren-ke, LIU Dong-dong, et al. Experimental analysis of removing the carbon deposition by magnetic grinding from the inner surface of an aero-engine turbo-shaft[J]. Surface technology, 2020, 49(1): 336-342.
- [10] QIAN C, FAN Z H, TIAN Y B, et al. A review on magnetic abrasive finishing[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2020, 112(3-4): 658.
- [11] HENG L D, KIM J S, TU J F, et al. Fabrication of precision meso-scale diameter ZrO<sub>2</sub> ceramic bars using new magnetic pole designs in ultra-precision magnetic abrasive finishing[J]. Ceramics international, 2020, 46(11): 735.
- [12] KODAMA S, YAMAGUCHI H, SHIMADA K, et al. Control of short-pulsed laser induced periodic surface structures with machining-picosecond laser nanotexturing with magnetic abrasive finishing[J]. Precision engineering, 2019, 60: 354.
- [13] 姜林志, 张桂香, 秦璞, 等. 磁性磨料和磨粒相粒径对磁力研磨效率的影响[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(4): 157-160.  
JIANG Lin-zhi, ZHANG Gui-xiang, QIN Pu, et al. Effects of particle size and core size of magnetic abrasive on efficiency of magnetic abrasive finishing[J]. Electroplating & finishing, 2019, 38(4): 157-160.
- [14] TAN X X, WANG S Y, CHEN Y, et al. Design, preparation and characterization of iron nitride magnetic abrasives[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 774: 389.
- [15] LI W H, LI X H, YANG S Q, et al. A newly developed media for magnetic abrasive finishing process: Material removal behavior and finishing performance[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 260: 687.
- [16] 梁伟, 张桂香, 张鹏, 等. 磁力研磨光整加工 ZrO<sub>2</sub> 陶瓷材料试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 310-316.  
LIANG Wei, ZHANG Gui-xiang, ZHANG Peng, et al. Experimental research on magnetic abrasive finishing for ZrO<sub>2</sub> ceramic materials[J]. Surface technology, 2018, 47(9): 310-316.
- [17] SINGH G, KUMAR H, KANSAL H K, et al. Effects of chemically assisted magnetic abrasive finishing process parameters on material removal of Inconel 625 tubes[J]. Procedia manufacturing, 2020, 48: 325.
- [18] KALA P, SHARMA V, PANDEY P M. Surface roughness modelling for double disk magnetic abrasive finishing process[J]. Journal of manufacturing processes, 2017, 25: 124.
- [19] WU J Z, ZOU Y H, SUGIYAMA H. Study on ultra-precision magnetic abrasive finishing process using low frequency alternating magnetic field[J]. Journal of magne-



- tism and magnetic materials, 2015, 386: 985.
- [20] 丁文锋, 傅玉灿, 赵彪, 等. 基于开放孔隙的钎焊 CBN 多孔砂轮研制与磨削加工性能[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(5): 74-78.
- DING Wen-feng, FU Yu-shan, ZHAO Biao, et al. Grinding performance of brazed CBN abrasive wheels based on open pore structures[J]. Diamond & abrasive engineering, 2020, 40(5): 74-78.
- [21] LI Z, DING W F, LIU C J, et al. Grinding performance of TiC<sub>p</sub>/Ti-6Al-4V composites with CBN wheels, part I: Experimental investigation and surface features[J]. Procedia CIRP, 2018, 77: 894.
- [22] DING W F, LI Z, LIU C J, et al. Grinding performance of TiC<sub>p</sub>/Ti-6Al-4V composites with CBN wheels, part II: Material removal behavior based on FEM[J]. Procedia CIRP, 2018, 77: 589.
- [23] DAI J B, SU H H, YU T F, et al. Experimental investigation on materials removal mechanism during grinding silicon carbide ceramics with single diamond grain [J]. Precision engineering, 2018, 51: 624.
- [24] 梁伟, 张桂香, 张鹏, 等. 球形磁性磨料磁力研磨 ZrO<sub>2</sub> 材料机理研究[J]. 现代制造工程, 2020(2): 1-5.
- LIANG Wei, ZHANG Gui-xiang, ZHANG Peng, et al. Mechanism of magnetic abrasive finishing of ZrO<sub>2</sub> material with spherical magnetic abrasive[J]. Modern manufacturing engineering, 2020(2): 1-5.
- [25] YAMAGUCHI H, SHINMURA T, KANEKO T. Development of a new internal finishing process applying magnetic abrasive finishing by use of pole rotation system[J]. Precision engineering, 1996, 30(4): 317-322.
- [26] GORANA V K, JAIN V K, LAL G K. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2004, 44: 201-211.
- [27] 陈春增, 张桂香, 赵玉刚. 磁力研磨对 Inconel 718 合金表面质量的影响[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(1): 23-27.
- CHEN Chun-zeng, ZHANG Gui-xiang, ZHAO Yu-gang. Effect of magnetic abrasive finishing on surface quality of Inconel 718 alloy[J]. Electroplating & finishing, 2016, 35(1): 23-27.

(上接第 337 页)

- [18] 宋成朋. KDP 晶体微水雾溶解抛光方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- SONG Cheng-peng. Study on micro water mist dissolution and polishing method of KDP crystal[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [19] 李文虎, 潘勇, 雷维新, 等. 等离子体处理对石墨膜表面亲水性的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(4): 35-41.
- LI Wen-hu, PAN Yong, LEI Wei-xin, et al. Effect of plasma treatment on surface hydrophilicity of graphite film[J]. Surface technology, 2018, 47(4): 35-41.
- [20] 傅念清, 王云英, 孟江燕, 等. 冷等离子体处理工艺对丁腈橡胶表面性能的影响[J]. 表面技术, 2016, 45(12): 117-123.
- FU Nian-qing, WANG Yun-ying, MENG Jiang-yan, et al. Effect of cold plasma treatment on surface properties of NBR[J]. Surface technology, 2016, 45(12): 117-123.
- [21] SHISHOO R. Plasma technologies for textiles[M]. [s. l.]: Woodhead Publishing Ltd, 2007: 1-322.
- [22] LIU X, HUANG S, CHEN F Z, et al. Research on the cold plasma jet assisted cutting of Ti6Al4V[J]. The International journal of advanced manufacturing technology, 2015, 77(9-12): 2125-2133.
- [23] 王碧玲. KDP 晶体无磨料水溶解抛光方法与加工机理[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- WANG Bi-ling. Method and mechanism of abrasive free water solution polishing of KDP crystal[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [24] 霍远樑. 界面润湿性对流固摩擦俘能的调控机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- HUO Yuan-liang. Mechanism of interfacial wettability regulating convective solid friction energy capture[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [25] 李超. 化学机械抛光中流体压力和摩擦特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- LI Chao. Study on fluid pressure and friction characteristics in chemical mechanical polishing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [26] 王国斌. 微尺度下油膜缝隙流动中的壁面滑移特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- WANG Guo-bin. Research on wall slip characteristics in oil film crack flow at micro scale[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.