

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160803001

# 主轴式滚磨光整加工过程中滚抛磨块作用力测试与分析

陈玉楠<sup>1,2</sup>, 李文辉<sup>1,2</sup>, 李秀红<sup>1,2</sup>, 王秀枝<sup>1,2</sup>

(1. 太原理工大学 机械工程学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学 精密加工山西省重点实验室, 太原 030024)

**摘要:** 在不同加工参数下, 通过测试主轴式滚磨光整加工中工件受滚抛磨块作用力情况, 寻找工件在加工中的受力规律并研究其加工机理, 以此对理论分析和实际加工提供参考依据。改变工件安装位置发现, 超过60%的位置处滚抛磨块对工件表面作用力与工件距滚筒中心距离或工件没入滚抛磨块深度成二次函数关系, 其余均为幂函数关系, 并且在正对磨块流处工件所受平均作用力最大, 为其他3个方位处的4.5~8倍。同时, 从摩擦因数角度分析, 滚抛磨块对正对磨块流处的工件表面主要为碰撞和挤压作用, 两侧处主要为刻划作用, 并通过三维电控超景深显微镜观察方管加工前后的表面纹理加以论证。滚抛磨块润湿后, 内外侧摩擦因数分别为0.034和0.18, 远低于干燥时的0.13和0.49, 说明润湿后, 摩擦因数大幅减小, 滚抛磨块滚动数量相对增多, 尤其是内侧变化更为明显。

**关键词:** 主轴式; 滚磨光整加工; 动态力信号; 作用力; 加工机理

中图分类号: TG580.692

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)01-0033-08

## Force Test and Analysis of Abrasive in Spindle Barrel Finishing Process

CHEN Yu-nan<sup>1,2</sup>, LI Wen-hui<sup>1,2</sup>, LI Xiu-hong<sup>1,2</sup>, WANG Xiu-zhi<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024; 2. Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

**Abstract:** The force on workpiece under the different processing parameters was measured in spindle barrel finishing. The rule of force and the process mechanism were investigated to provide references for theoretical analysis and practical process. By changing the mounting location of workpiece, the force was found to be a quadratic function of the distance between the workpiece and the center of drum or the free surface in the case of more than 60% of mounting location, while the rest was that of power function. Moreover, the mean force on workpiece in the direction of facing the abrasive flow is maximum, which is 4.5 to 8 times of other three directions. From the perspective of friction factor, the surface of workpiece in the direction of facing the abrasive flow is impacted and squeezed while the surface of the two parallel sides is stroked by the abrasive. Furthermore, surface texture of the square tube before and after processing were observed through three-dimensional electronically controlled ultra-depth microscope to demonstrate the above conclusion. The friction factor of the two sides in the wet condition is 0.034 and 0.18, respectively, which is much lower than that in the dry condition, 0.13 and 0.49. The friction factor is decreased substantially and the number of rolling abrasive is relatively increased, which is obvious especially in the inner side.

**Keywords:** spindle; barrel finishing; dynamic force signals; force; process mechanism

收稿日期: 2016-08-03; 修回日期: 2016-11-24

网络出版日期: 2017-01-04 14:26; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170104.1426.008.html>

通讯作者: 李文辉(1975—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 精密零件表面光整加工技术; E-mail: 2585700812@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(U1510118); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20131402110002); 山西省科技攻关项目(2015031011-3)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China(U1510118), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20131402110002) and Science and Technology Project of Shanxi Province(2015031011-3)

引文格式: 陈玉楠, 李文辉, 李秀红, 等. 主轴式滚磨光整加工过程中滚抛磨块作用力测试与分析[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 33-40.

CHEN Y N, LI W H, LI X H, et al. Force test and analysis of abrasive in spindle barrel finishing process[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 33-40.

## 0 引言

目前,滚磨光整加工技术已经广泛应用于各行业零件的表面光整加工<sup>[1-2]</sup>。作为一种自由磨具光整加工技术,通过对工件表面进行碰撞、滚压、滑擦和刻划的微量磨削作用,从而改变工件表面的几何特征,改善表面层的物理力学性能,综合改善工件的表面完整性。

对于滚磨光整加工中工件所受作用力,国外一些学者以振动光饰机为对象进行相关测试及分析。加拿大多伦多大学的S. Wang等<sup>[3]</sup>及日本广岛大学的A. Yabuki等<sup>[4]</sup>通过在立式振动光饰机中测试滚抛磨块对工件的法向力,发现其粗糙度和硬度的改变主要受润滑条件和滚抛磨块大小的影响。加拿大多伦多大学的Mohammad Reza Baghbanan等<sup>[5]</sup>在卧式振动光饰机中同时测试滚抛磨块的法向力和切向力并将其与铝合金工件的表面粗糙度、硬度、材料去除量及残余曲率相关联以研究其变化规律。加拿大多伦多大学的S.E. Naein等<sup>[6]</sup>及美国铁姆肯公司的Xiaozhong Song等<sup>[7]</sup>通过研究卧式振动光饰机中单层磨块流的运动,发现在磨液中添加不同化学试剂对工件的加工效果影响很大。但对于工件安装位置及润滑条件的影响趋势,均缺少深入细致的针对性研究。

目前国内对滚磨光整加工的受力分析还多停留在理论分析和仿真研究。太原理工大学李文辉等<sup>[8]</sup>分别从运动学模型、设备参数等方面介绍滚磨光整加工的运动分析和接触力分析方法,但未做具体的试验研究;太原理工大学田雨等<sup>[9]</sup>通过三维EDEM软件建立曲轴滚磨光整加工动态模型,对加工过程中曲轴平均接触力做模拟分析,虽考虑到法向力和切向力不同的加工机理,但未做详细对比分析;浙江师范大学丁金福等<sup>[10]</sup>则根据磨块流的流变特性并结合COMSOL Multiphysics软件仿真研究磨块流加工中抽象微切削力的变化规律,但焦点多集中微切削力对表面质量的提高,对影响微切削力的加工参数研究较为不足。

文中从实际加工角度出发,优先选择工件安装位置和润滑条件为加工变量,对主轴式滚磨光整加工试验设备加工过程中工件所受作用力进行测试及分析,定量地主轴式滚磨光整描述加工过程中不同加工参数对作用力的影响,对理论分析和实际加工提供指导。

## 1 试验条件

### 1.1 测试平台

试验装置为主轴式滚磨光整加工试验设备、动态力传感器(型号为501F01)及其固定工装、数据采集系统(DH5902坚固型)、计算机。图1为动态力信号测试平台装置示意图。主轴式滚磨光整加工试验设备的滚筒有效深度为700 mm,外切圆直径为900 mm。试验采用球形滚抛磨块,粒径为3 mm,材料为氧化铝,滚筒装填量为70%,滚筒转速为50 r/min。

传感器固定工装中,传感器的位置由两个内外套在一起的钢管上下调节,传感器固定于内管的外壁上(图2),传输线内含于内管中,以减少振动,保证数据稳定传输。动态力传感器灵敏度为10.69 mV/N,测量极限为500 N。文中所提工件即为固定传感器的内管。

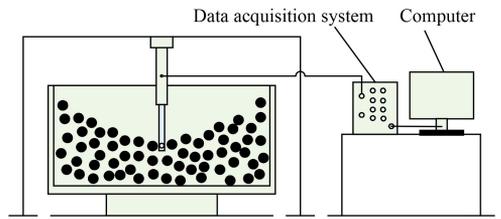


图1 动态力信号测试平台装置示意图

Fig.1 Device schematic diagram of force signal test bench

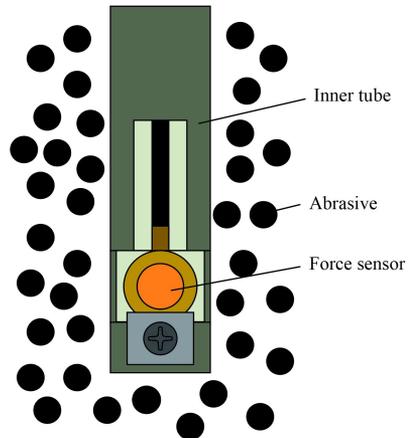


图2 力传感器及其固定内管装置示意图

Fig.2 Device schematic diagram of force sensor and its fixing inner tube

### 1.2 测试内容

#### 1.2.1 干燥时不同位置处动态力信号测试

根据工件距离滚筒中心不同及工件没入滚抛磨块深度不同,试验中选取19处位置进行测试采

样, 图3为干燥试验条件下采样点位置示意图。

图3中, 以滚筒中心为纵轴, 以滚筒径向为横轴, 设每个采样点的坐标为( $X, Y$ ),  $X$ 表示采样点到滚筒中心的垂直距离,  $Y$ 表示采样点距离加工时滚抛磨块自由面的垂直距离, 为方便绘图, 特设 $Y'$ 为采样点距离滚筒底面的垂直距离, 双点划线表示工作时滚抛磨块自由面, 则此19个采样点的坐标见表1。

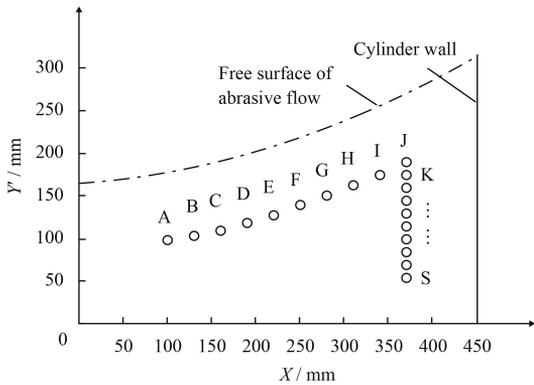


图3 干燥试验条件下采样点位置示意图

Fig.3 Schematic diagram of sampling points location under the dry test condition

表1 干燥试验条件下采样点坐标

Table 1 Coordinate of sampling points under the dry test condition

| Points | A   | B   | C   | D   | E   | F   | G   | H   | I   | J   |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $X/mm$ | 100 | 130 | 160 | 190 | 220 | 250 | 280 | 310 | 340 | 370 |
| $Y/mm$ | 80  | 80  | 80  | 80  | 80  | 80  | 80  | 80  | 80  | 80  |
| Points | K   | L   | M   | N   | O   | P   | Q   | R   | S   |     |
| $X/mm$ | 370 | 370 | 370 | 370 | 370 | 370 | 370 | 370 | 370 |     |
| $Y/mm$ | 95  | 110 | 125 | 140 | 155 | 170 | 185 | 200 | 215 |     |

考虑到受力方向, 将每个采样点的径向均分为4个方位, 即正对磨块流、背对磨块流及平行于磨块流的两侧面(两侧面分为内侧和外侧, 其中, 内侧为距离滚筒中心近侧), 其符号定义如表2。此试验中未添加水及磨剂, 为干燥情况下滚抛磨

表2 干燥试验条件下采样点方位符号定义

Table 2 Symbol definition of direction of sampling points under the dry test condition

| Symbol definition | Meaning                             |
|-------------------|-------------------------------------|
| 1                 | Positive to the abrasive flow       |
| 2                 | Parallel to the outer abrasive flow |
| 3                 | Parallel to the inner abrasive flow |
| 4                 | Back to the abrasive flow           |

块作用力测试。每个采样点在每个方位上分别有效地测试3次, 采样频率为5 000 Hz。

### 1.2.2 润湿时不同位置处动态力信号测试

在上述测试条件下, 选择A、B、C、D、E、F、G、H、I、J这10个采样点(保持工件没入滚抛磨块深度一致), 添加水对滚抛磨块完全润湿后将水排干, 测试滚抛磨块作用力情况。

## 2 试验结果

### 2.1 干燥时动态力信号测试

#### 2.1.1 动态力信号整体趋势

各采样点在各方位上的信号总体变化趋势基本一致, 此处以J点为例研究动态力信号整体变化趋势。图4为干燥试验条件下J1处动态力信号图。

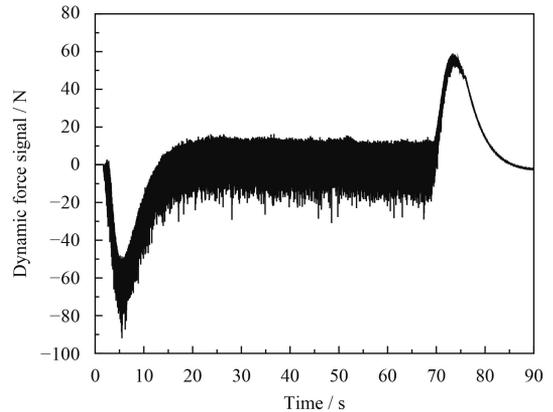


图4 干燥试验条件下J1处动态力信号图

Fig.4 Force signal of sampling point J1 under the dry test condition

可以看出, 0~2 s为加工前, 压力信号稳定在零值附近; 2 s时滚筒开始转动, 传感器表面受到较大的瞬时冲击力(约为90 N), 随后压力信号慢慢增大至零值附近稳定波动, 此时即为稳定加工阶段, 滚抛磨块持续对传感器表面碰撞、挤压、划擦等; 70 s时滚筒停止转动, 传感器卸载, 其内部受力敏感元件弹性变形恢复, 压力信号迅速增大, 直至一个数值小于瞬时冲击力的弹性恢复力(大致为60 N), 随之减小, 逐渐稳定回零值附近。

试验选用的动态力传感器为压电式传感器, 受力后其内部石英晶体发生形变, 在电极上会出现等量的正负电荷, 传感器受压后传输出负值力, 其正值力则为石英晶体的弹性恢复力。

#### 2.1.2 动态力信号稳定阶段分析

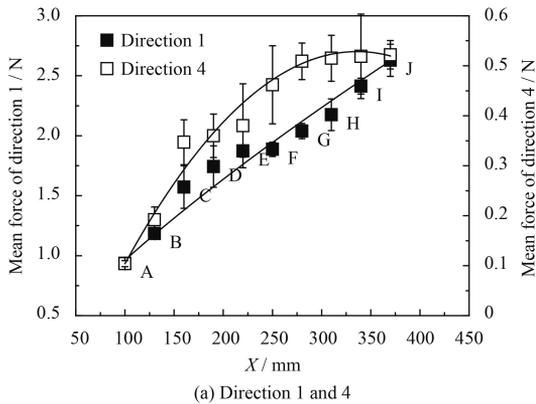
滚抛磨块对工件的有效加工主要发生在信号

的稳定波动阶段,且动态力信号的负值部分体现的是滚抛磨块对工件的加工作用力。由于采集到的动态力信号有正有负,此文特提取出稳定阶段信号的负值数据取正并取均值,绘制散点图5~6。

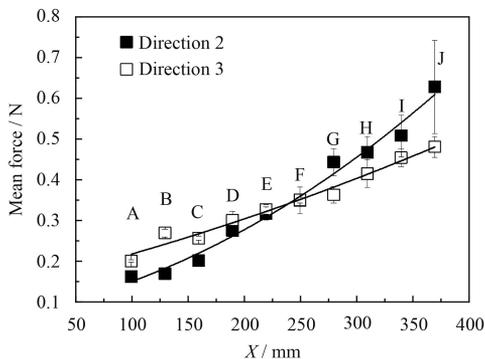
图5为干燥试验条件下距离滚筒中心不同位置对各方位处平均力的影响,图6为干燥试验条件下工件没入磨块深度不同对各方位处平均力的影响。两个图中实线为离散点的拟合曲线,将其拟合方程统计至表3所示。表3中, $R^2$ 为判定系数,计算如下:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

其中, $SSR$ 为回归平方和, $SST$ 为总误差平方和, $y$ 为样本数据, $R^2$ 为回归平方和占总误差平方和的比例,可反映出曲线的拟合程度, $R^2$ 越趋近于1,说明拟合方程越佳。此四幅图中曲线所选拟合函数为线性函数、二次函数、指数函数、对数函数、幂函数中的最佳拟合函数。



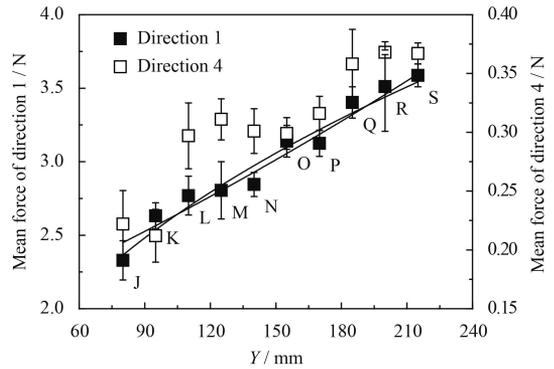
(a) Direction 1 and 4



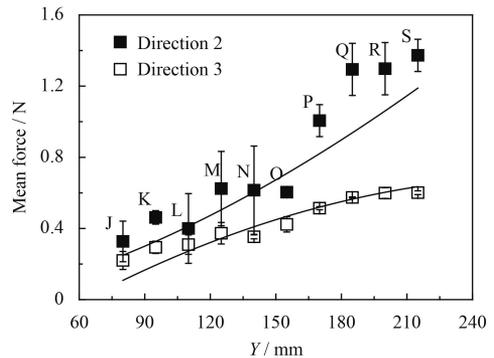
(b) Direction 2 and 3

图5 干燥试验条件下距离滚筒中心不同位置对各方位处平均力的影响

Fig.5 Effects of different distance from the center of drum on mean force in each direction with workpiece under the dry test condition



(a) Direction 1 and 4



(b) Direction 2 and 3

图6 干燥试验条件下工件没入磨块不同深度对各方位处平均力的影响

Fig.6 Effects of different distance from free surface of abrasive on mean force in each direction with workpiece under the dry test condition

表3 干燥试验条件下平均力拟合方程

Table 3 Fitting equations of mean force under the dry test condition

| Condition | Fitting equation                     | $R^2$   |
|-----------|--------------------------------------|---------|
| F5a-D1*   | $y = 0.036 7x^{0.719 1}$             | 0.956 2 |
| F5a-D4    | $y = -2E-06x^2 + 0.002 8x - 0.132 5$ | 0.945 5 |
| F5b-D2    | $y = 2E-06x^2 + 0.000 6x + 0.062 5$  | 0.98    |
| F5b-D3    | $y = 5E-07x^2 + 0.000 7x + 0.144 9$  | 0.969 1 |
| F6a-D1    | $y = 0.461 6x^{0.378}$               | 0.942 1 |
| F6a-D4    | $y = 2E-06x^2 + 0.000 7x + 0.169 1$  | 0.848 5 |
| F6b-D2    | $y = 0.001 4x^{1.292 6}$             | 0.963 5 |
| F6b-D3    | $y = 1E-05x^2 - 0.000 1x + 0.196 7$  | 0.957 8 |

\* Note: F5a-D1 represents the direction 1 in fig.5(a), all the rest are in the same way

随工件远离滚筒中心或深入滚抛磨块,各方位上滚抛磨块对工件的平均力5处以二次函数递增,3处以指数函数递增,但方位1处平均力最大,平均为方位2处的4.5倍,为方位3处6.3倍,为方位4处8倍。

对比图5(b)和图6(b),可发现E点之前方位3的

平均力大于方位2处, F点之后方位2处平均力则均大于方位3处, 且差距越来越大。这说明当工件靠近滚筒中心时, 工件周围的滚抛磨块流动速度较慢, 滚抛磨块更多会低速地滚过工件两侧面, 而远离滚筒中心时, 滚抛磨块对工件表面挤压增强, 滑擦作用也增多, 方位3处更显著, 受力逐渐增大并超过方位2处, 且此情况随工件深入滚抛磨块会加重, 这与试验观察较为一致。

通过表3可知, 判定系数 $R^2$ 除F6a-D4处外均达到0.9, 说明拟合方程与离散数据较为贴近。与各方位比较, 方位4两处的 $R^2$ 值均相对最小, 这说明背对滚块流处工件受力最不稳定, 波动最大; 而方位2和方位3处 $R^2$ 值更高, 即平行磨块流处工件受力更为稳定, 这是由于两侧面主要受到滑擦, 碰撞较少。工件没入深度不同时拟合方程的二次项系数相对更大, 即曲线斜率更大, 这说明滚抛磨块作用力受工件没入深度影响更大。

### 2.1.3 摩擦因数分析

加工时, 滚抛磨块对工件的正压力起到挤压作用, 从而产生塑性变形与滑移; 轴向方向滚抛磨块在较大的正压力作用下产生犁削, 同时还受滚抛磨块产生的剪切力在该方向的犁削与剪切, 两者共同起到微切削作用<sup>[11]</sup>。观察试验可知, 正对磨块流处, 传感器表面所受碰撞作用更多; 而平行磨块流处, 传感器表面受到滑擦作用更多; 背对磨块流处则为加工的空白区域, 基本没有滚抛磨块与工件表面直接接触。

为计算摩擦因数, 此处将方位1处平均力作为法向力, 方位2和方位3分别作为切向力, 则摩擦因数=切向力/法向力, 图7为干燥试验条件下切向

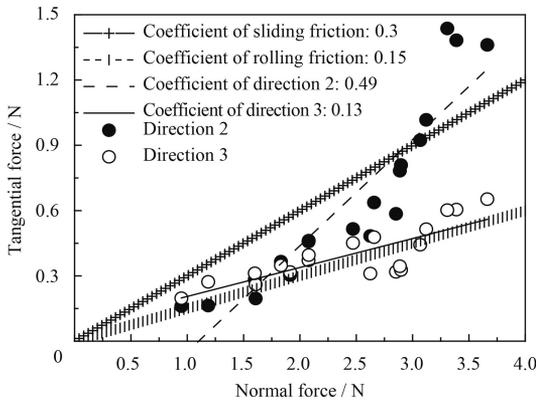


图7 干燥试验条件下切向力与法向力的合力

Fig.7 Resultant shear force and associated normal force under the dry test condition

力与法向力的合力。

通过堆积角模拟实验, 并结合所获得的堆积角对摩擦因数进行交互作用的正交试验法寻找显著因素, 从而可得到正交最优参数组合, 即滚抛磨块的滑动摩擦因数为0.3, 滚动摩擦因数为0.15。其中, 堆积角的模拟与实验实现过程<sup>[11]</sup>为: 首先将一定数量的磨块颗粒放入套筒内, 待磨块颗粒在套筒内静止后, 缓慢提起套筒使磨块颗粒从套筒底部慢慢排出, 从而在平板上形成1个稳定的磨块堆, 待磨块堆稳定后, 测量磨块堆的堆积角, 结果如图8所示。

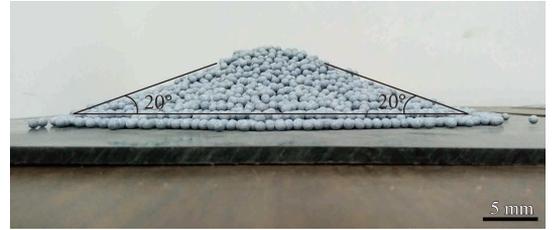


图8 氧化铝球形滚抛磨块堆积角实验结果<sup>[11]</sup>

Fig.8 Experimental result of repose angles of alumina spherical abrasive<sup>[11]</sup>

方位2处拟合直线的斜率为0.49, 明显大于滑动摩擦因数, 而方位3处拟合直线斜率为0.13, 略小于滚动摩擦因数, 这反映出这两处方位的滚抛磨块对工件表面的加工作用不完全一样。从散点分布上看, 方位2的19处采样点有17处(超过89%)位于滚动摩擦因数之上, 其中, 5处(26%)位于滑动摩擦因数之上; 而方位3仅有14处(74%)位于滚动摩擦因数之上, 且无采样点在滑动摩擦因数之上, 这说明干燥情况下平行磨块流两侧的滚抛磨块在工件表面主要发生滑擦现象, 但外侧明显多余内侧, 而内侧相对外侧发生滚动现象更多。

### 2.1.4 表面形貌

由以上分析可知, 加工工件时, 正对磨块流处主要受到滚抛磨块的碰撞作用, 而平行磨块流的两侧则更多受到滑擦影响, 通过表面形貌图可作直观验证。选择横截面为16 mm×16 mm、厚度为1 mm的普通碳钢方管为工件。由于平行磨块流外侧受力大于内侧受力, 考虑到加工力越小材料去除速度越慢, 更容易清晰地观察到纹理的变化, 加工面选择正对磨块流和平行磨块流内侧两处。成形方管表面纹理均匀一致, 为观察到纹理变化, 加工前, 预将方管待加工面通过砂纸打磨

粗糙,并通过三维电控超景深显微镜观察加工前表面纹理图,经1和3 min加工后再次观察其表面纹理图,结果如图9所示。

对比图9中的表面纹理图,加工前方位1和方位3处划痕凌乱明显,方位1处在加工1 min后划痕基本消失,3 min后表面纹理平整均匀;而方位

3处在加工1 min后可看到从右上角向左下角的单向纹理明显增多,但经砂纸打磨后的划痕也清晰可见,加工3 min后则划痕明显减少,而倾斜的纹理隐约可见,分布更均匀一致。由此可见,正对磨块流处加工力明显强于平行磨块流内侧,而两侧加工则主要依靠滚抛磨块对工件表面的滑擦作用。

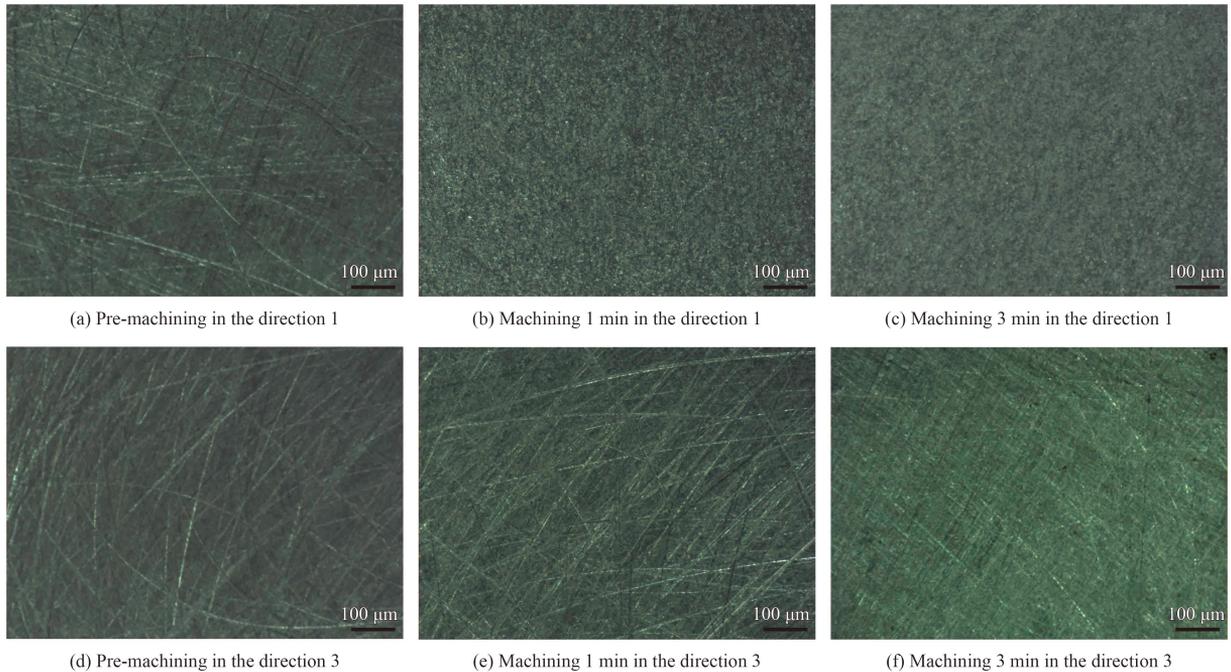


图9 干燥试验条件下方管加工前后方位1和方位3处表面纹理形貌

Fig.9 Pre-machining and post-machining surface texture morphologies in the direction 1 and direction 3 of square tube under the dry test condition

## 2.2 润湿时动态力信号测试

### 2.2.1 平均力对比分析

在润湿条件下,选择A到J这10处采样点,即保持工件没入滚抛磨块深度一致而距离滚筒中心不同,提取动态力稳定状态下的平均力及干燥条件下4处方位的平均力(对应为图5中数据)分别一一做对比分析。图10为距离滚筒中心不同时干燥和润湿试验条件下各方位处的平均力对比结果。

与干燥情况下相比,水润湿后方位1处70%采样点的平均力更大,而方位2处80%采样点的平均力更小,剩下2处方位平均力均明显更小。比较差值可知,方位2处平均力润湿后降幅最大,可达87%,方位1处最大仅达到30%。分析可知,当滚抛磨块润湿后其重量会增大,上层滚抛磨块对其压力及其离心力都会增大,故正对磨块流处的平均力会增大,但滚抛磨块间的接触面会更光滑,平行磨块流处的滑擦现象增多,则平均力会更小。

观察各采样点处干燥和润湿下平均力差值,除方位3处波动较大,其他3处方位在F点之后的差值明显比E点之前的差值大,后5处采样点差值均值至少为前5处的2倍,说明随工件距滚筒中心越远,滚抛磨块的润滑程度对工件所受作用力的影响越大,分析原因可知,当工件靠近滚筒中心时,滚抛磨块相对低速地滚动过工件表面,滚抛磨块润湿与否对其作用力影响较小,而随工件逐渐远离滚筒中心,滚抛磨块开始高速地滑擦过工件表面,滚抛磨块经润湿后摩擦因数减小,从而其作用力与干燥时相比下降幅度增大。

### 2.2.2 摩擦因数对比分析

根据干燥条件下定义,图11为湿润试验条件下切向力与法向力的合力。在滚抛磨块润湿情况下,方位2处拟合直线的斜率为0.18,稍大于滚动摩擦因数,明显低于干燥时的0.49;方位3处斜率为0.034,也明显低于干燥时的0.13。加水润湿

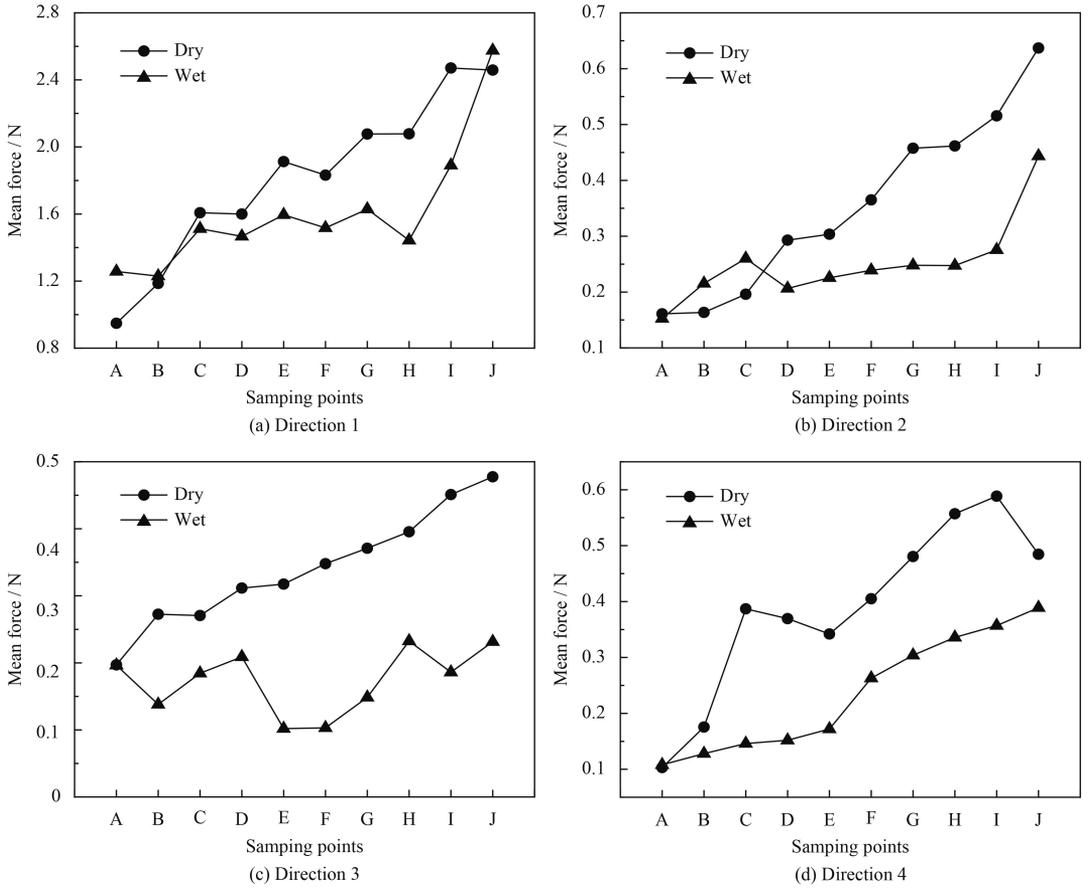


图 10 距离滚筒中心不同位置时干燥和润湿条件下各方位处的平均力对比

Fig.10 Comparison of mean force in each direction under dry and wet test conditons at different distance from the center of drum

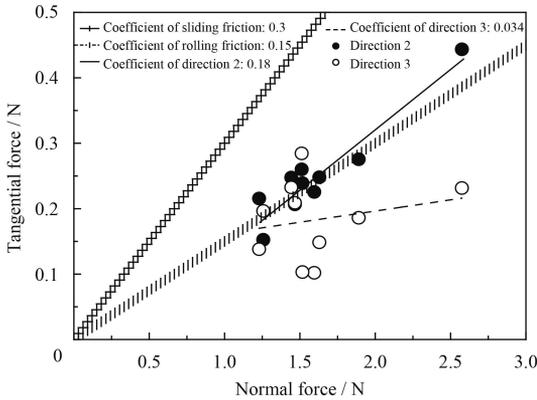


图 11 湿润试验条件下切向力与法向力的合力

Fig.11 Resultant shear force and associated normal force under the wet test condition

后, 滚抛磨块与工件表面的摩擦因数明显降低, 方位2处降幅更大, 这说明平行磨块流外侧的滚抛磨块在润湿后在工件表面滚动现象明显增多, 而其内侧在干燥时有5处(26%)摩擦因数低于滚动摩擦因数, 润湿后则有4处, 比例达到40%, 这更直观地反映出滚抛磨块的滚动现象大幅增多。

### 3 结论

(1) 工件加工时表面首先受到较大的瞬时冲击力, 此后滚抛磨块对其加工作用力稳定持续, 此时作用力低于瞬时冲击力的一半。

(2) 随工件靠近滚筒筒壁或没入滚抛磨块深度增大, 工件所受作用力在各方位上多以二次函数递增。工件在正对磨块流处受力最大, 增幅也最明显, 平行磨块流处两侧受力接近, 仅约为正对磨块流处受力的1/5。通过分析拟合方程可知滚抛磨块作用力受工件没入深度影响更大。

(3) 滚抛磨块对正对磨块流处的工件表面主要为碰撞和挤压作用, 平行磨块流两侧则更多为滑擦作用, 并通过加工方管表面, 对比加工前后其表面形貌图, 发现平行磨块流两侧在加工后出现明显均匀的单项纹理, 可对其有效论证。平行磨块流处两侧工件表面在干燥时受力相近, 经润湿后外侧受力明显高于内侧, 通过对比摩擦因数可发现, 干燥时滚抛磨块在两侧主要刻划工件表

面, 润湿后, 摩擦因数降幅超过2/3, 低于滑动摩擦因数的情况由之前的26%增大至40%, 说明滚压现象随之增多, 尤其是内侧变化更明显。

## 参考文献

- [1] 杨胜强, 李文辉, 陈红玲. 表面光整加工理论与新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.  
YANG S Q, LI W H, CHEN H L. Surface finishing theory and new technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011 (in Chinese).
- [2] LI W H, YANG S Q, YANG S C. Theoretic analysis and simulation on horization spindle barrel finishing[J]. Key Engineering Materials, 2009, 416: 332-336.
- [3] WANG S, TIMSIT R S, SPELT J K. Experimental investigation of vibratory finishing of aluminum[J]. Wear, 2000, 243(1/2): 147-156.
- [4] YABUKI A, BAGNBANAN M R, SPELT J K. Contact forces and mechanisms in a vibratory finisher[J]. Wear, 2002, 252(7): 635-643.
- [5] BAGHBANAN M R, YABUKI A, ROLAND S T. Tribological behavior of aluminum alloys in a vibratory finishing process[J]. Wear, 2003, 255(255): 1369-1379.
- [6] NAEINI S E, SPELT J K. Development of single-cell bulk circulation in granular media in a vibrating bed[J]. Power Technology, 2011, 211(1): 176-186.
- [7] SONG X Z, CHAUDHARI R, HASHIMOTO F. Experimental investigation of vibratory finishing process[R]. Proceeding of the ASME 2014 international manufacturing science and engineering conference, 2014: 1-7.
- [8] LI W H, YANG S Q, LI X H. Development status and trends of mass finishing processes[J]. Key Engineering Materials, 2014, 621: 111-120.
- [9] 田雨, 李文辉. 基于离散元法的曲轴滚磨光整加工机理分析[J]. 现代制造工程, 2015, 3: 79-83.  
TIAN Y, LI W H. Crankshaft barrel finishing mechanism analysis based on the discrete element method[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015, 3: 79-83 (in Chinese).
- [10] 丁金福, 刘润之, 张克华, 等. 磨粒流精密光整加工的微切削机理[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3324-3331.  
DING J F, LIU R Z, ZHANG K H, et al. Micro cutting mechanism of abrasive flow precision machining[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3324-3331 (in Chinese).
- [11] 张荔, 李文辉, 杨胜强. 滚磨光整加工中磨料颗粒堆积角的离散元参数标定[J]. 中国科技论文, 2016, 11(16): 1821-1825.  
ZHANG L, LI W H, YANG S Q. Calibration of discrete element parameters of abrasive particle in mass finishing process[J]. China Science Paper, 2016, 11(16): 1821-1825 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)