

表面质量控制及检测

主轴式滚磨光整加工弹塑性接触力修正计算

王娜¹, 杨胜强¹, 赵婷婷^{1,2}, 曹波¹, 赵恺¹

(1.太原理工大学 a.机械与运载工程学院 b.精密加工山西省重点实验室, 太原 030024,
2.Zienkiewicz Centre for Computational Engineering, College of Engineering,
Swansea University, Swansea SA1 8EN, UK)

摘要: **目的** 基于对主轴式滚磨光整加工弹塑性接触力修正系数研究的思路, 探究主轴式滚磨光整加工过程中工件及滚抛磨块之间的碰撞接触力与碰撞接触速度之间的定量关系。**方法** 采用 EDEM 系统中的 Hertz-Mindlin 接触模型进行模拟仿真, 首先以 Hertz 接触理论以及牛顿第二定律为基础, 推导弹性正面碰撞接触力与碰撞接触速度之间的关系表达式, 然后在 Thornton 弹塑性假设的基础上建立滚抛磨块与工件之间弹塑性接触力与碰撞接触速度之间的关系表达式, 并将不同转速下工件与滚抛磨块之间的弹塑性正面碰撞接触力计算结果与实验测试结果进行对比分析, 最后通过量化结构变位系数进一步修正弹塑性接触力计算公式。**结果** 基于 Hertz 接触理论、牛顿第二定律以及 Thornton 接触力学模型, 推导了出速度修正系数表达式, 且速度修正系数在 0.32~0.58 之间。同时考虑结构变位修正系数, 基于 Matlab, 经过试算求得结构的变位修正系数在 0.50~2.41 之间, 修正后的弹塑性接触力计算结果与实验测试结果的相对误差在 0.122%~8.901%之间。**结论** 滚抛磨块与工件之间的弹塑性接触力计算公式, 理论依据充分, 参数明确, 可以为滚磨光整加工实际工艺制定提供可信的计算方法。

关键词: 主轴式滚磨光整加工; EDEM 仿真模拟; Hertz 接触理论; 弹塑性接触力; 修正系数

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)08-0333-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.08.039

Correction Calculation on Elasto-Plastic Contact Force of Spindle Barrel Finishing

WANG Na¹, YANG Sheng-qiang¹, ZHAO Ting-ting^{1,2}, CAO Bo¹, ZHAO Kai¹

(1.a. College of Mechanical and Vehicle Engineering, b. Shanxi Key Laboratory of Precision Machining,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China, 2.Zienkiewicz Centre for Computational Engineering,
College of Engineering, Swansea University, Swansea, SA1 8EN, UK)

ABSTRACT: The paper aims to explore the quantitative relationship between the contact force and the contact speed of the

收稿日期: 2019-08-18; 修订日期: 2019-11-18

Received: 2019-08-18; **Revised:** 2019-11-18

基金项目: 国家自然科学基金 (U1510118, 51875389, 51975399); 山西省自然科学基金 (201801D111002)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (U1510118, 51875389, 51975399), Natural Science Foundation of Shanxi Province (201801D111002)

作者简介: 王娜 (1988—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为精密零件表面光整加工技术。

Biography: WANG Na (1988—), Female, Doctor candidate, Research focus: surface finishing technology for precision surface.

通讯作者: 杨胜强 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密零件表面光整加工技术。邮箱: tutysq@263.net.cn

Corresponding author: YANG Sheng-qiang (1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface finishing technology for precision surface. E-mail: tutysq@263.net.cn

引文格式: 王娜, 杨胜强, 赵婷婷, 等. 主轴式滚磨光整加工弹塑性接触力修正计算[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 333-341.

WANG Na, YANG Sheng-qiang, ZHAO Ting-ting, et al. Correction calculation on elasto-plastic contact force of spindle barrel finishing[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 333-341.

workpiece and the roller-grinding media during the spindle barrel finishing process based on the thinking on studying the correction factor for elasto-plastic contact force of spindle barrel finishing process. The Hertz-Mindlin contact model in EDEM system was used for the simulation. The relational expression between the elastic head-on collision contact force and the contact speed was deduced based on the Hertz contact theory and the Newton's second law. Then the relational expression between the elasto-plastic contact force and the contact speed was established based on the Thornton's elasto-plastic hypothesis. The calculated results of the elasto-plastic contact force between the workpiece and the roller-grinding media under different rotating speeds were compared with the results in the experiment. The formula of the elasto-plastic contact force was corrected by quantization of the structural correction factor. Based on the Hertz contact theory, the Newton's second law and the Thornton contact mechanics model, the expression of the velocity correction factor was derived with the value between 0.32 and 0.58. Meanwhile, considering the structural displacement correction factor and based on Matlab, the structural displacement factor was obtained between 0.50 and 2.41. The relative error between the corrected calculation results of the elasto-plastic contact force and the experiment results was between 0.122% and 8.901%. The formula for the elasto-plastic contact force between the workpiece and the media is robust in theory and brief in calculation, which can provide a credible help for the design of the barrel finishing process.

KEY WORDS: spindle barrel finishing processing; EDEM simulation; Hertz contact theory; elastic-plastic contact force; correction factor

滚磨光整加工技术^[1]是机械加工领域的一类基础性制造工艺技术,旨在提高零件表面质量,改善零件表面完整性,属于精密和超精密加工的范畴。随着滚磨光整加工技术应用市场的不断扩展,以及人们对专业从事滚磨光整加工技术研发需求的不断提高^[2-6],面对光整加工零件多变、要求多样的实际,传统依照经验进行实验摸索来制定最优工艺方案的模式不能满足快速发展的要求。根据滚磨光整加工工艺特点,采用离散元仿真模拟技术实现工艺仿真,能减少或替代繁杂的工艺实验。目前,基于离散元理论的 EDEM 软件的研发为各类实际工程问题^[7]提供了参考,很多学者已经采用该软件对滚磨光整加工工艺参数进行了定量分析^[8,14],但离散元仿真模拟中磨块与工件之间接触力或磨块运动轨迹与实际工况的吻合程度尚未确定,因此很难使离散元仿真模拟真正用于工艺方案制定。

现阶段,对于滚磨光整加工工艺的仿真模拟,国内外学者直接选用 Hertz-Mindlin (Hertz-MD) 接触模型。其中,田雨等^[9]建立了曲轴卧式滚磨光整加工动态模型,考虑法向力和切向力的变化,对加工过程中曲轴表面平均接触力做模拟分析;闫霞^[10]等对瀑布式振动光饰加工中的滚抛磨块进行仿真,分析了不同加工参数下滚抛磨块介质与工件间各参数的变化规律;宋春花^[11]对离心式滚磨光整加工中磨料与工件的动力学模型进行了理论分析和仿真模拟;陈懿^[12]在对卧式离心滚磨介质运动进行理论分析的基础上,进行了数值模拟与分析;李文辉^[13]等对离心式滚磨光整加工中磨块的运动机制和分布特征进行了理论和仿真分析。通过对上述文献的阅读研究发现,均未做相关实验来验证分析采用 Hertz-MD 接触模型的合理性。

目前,提高高端装备制造的关重件表面多采用主轴式滚磨光整加工。即,被加工工件装夹固定在回转

主轴上,加工时,工件伸入装有一定量滚抛介质并做回转运动的滚筒中,工件主轴与滚筒主轴平行并保持合适的距离。这样,滚抛磨块与工件表面会产生碰撞、滚压、滑擦和刻划等微量磨削作用,从而提高零件表面质量和表面完整性。

本文考虑仿真模拟与实验验证的可比性,针对主轴式滚磨光整加工设计构建完全相同的装置和工艺参数环境,研究滚抛磨块与工件之间接触力的关系。首先对不同转速下的滚抛磨块与工件之间的接触力进行实验测试,同时选用 EDEM 系统中 Hertz-MD 接触模型对不同转速下的工况进行仿真模拟。然后基于 Hertz 弹性碰撞理论、牛顿第二定律、Thornton 弹塑性假设,推导了弹性碰撞接触解以及名义弹塑性碰撞接触力与碰撞接触速度之间的关系,引入速度修正系数。在此基础上,通过进一步量化工件结构变位系数对于接触力的影响,建立滚抛磨块与工件之间的弹塑性接触力计算公式,并进行实验验证。理论依据充分,参数明确,为滚磨光整加工实际工艺制定提供可信的计算方法。

1 实验与仿真

1.1 实验测试

以实际应用的主轴式滚磨光整加工设备为基础,考虑到以测试工件与滚抛磨块之间接触力为目的,以及压力传感器信号传输的可靠性,实验时保持主轴固定不动。传感器位置通过两个内外相套的钢管(内管直径 15 mm,外管直径 30 mm)上下调节,将传感器固定于内管的外壁上(文中工件即为固定传感器内管),传输线穿过内管以减少振动。该装置可以解决传输线放置问题,并且保证数据传输的相对稳定。同

时, 考虑采用 EDEM 仿真模拟滚磨光整加工过程与实验验证的可比性, 兼顾仿真运算的精准程度和效率, 在原有设备基础上设计搭建了实验和模拟完全相同的装置和工艺参数环境。实验装置如图 1 所示, 其中回转滚筒材料为 201 不锈钢 (0Cr18Ni9), 直径为 216 mm, 高为 210 mm。滚抛磨块采用平均直径 $D=6.2044$ mm (标准差 $S.D.=0.0504$, 样本数为 80) 的棕刚玉球形磨块 (如图 2 所示), 磨块装入量为滚筒容积的 60%。

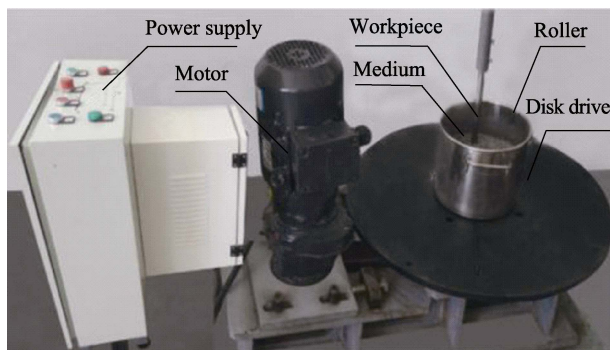


图 1 实验装置

Fig.1 Experimental equipment installation



图 2 滚抛磨块

Fig.2 Roller-grinding media

采用型号为 501F01 的动态力传感器 (北京一洋应振测试技术有限公司)、DH5902 坚固型数据采集系统 (江苏东华测试技术股份有限公司), 采集滚抛磨块与工件之间的接触力数据。设置动态力传感器灵敏度为 10.0 mV/N , 测试量程为 50 N , 采样频率为 5000 Hz , 实验始终保持传感器正面与滚筒中心轴线共面。动态力测试装置如图 3 所示。在实验过程中, 考虑噪声对信号的影响, 待实验测试结束后, 利用 haar 算子对信号进行小波降噪处理。不同转速下, 距离中心轴 $x=70 \text{ mm}$ 且距离桶底 $z=85 \text{ mm}$ 处的滚抛磨块与工件之间正面碰撞的接触力, 通过 2 级 haar 小波去噪之后的信号重构图见图 4。由图 4 可知, 每次改变转速, 接触力信号发生微小波动, 先减后增, 随后再次达到稳定。随着转速的增加, 滚抛磨块与工件之间的接触作用力越来越大。根据传感器本身特性, 将去噪后的接触力测试值进行处理, 去除正压力值 (卸载后的弹性恢复力), 保留负压力值, 并求平均值。

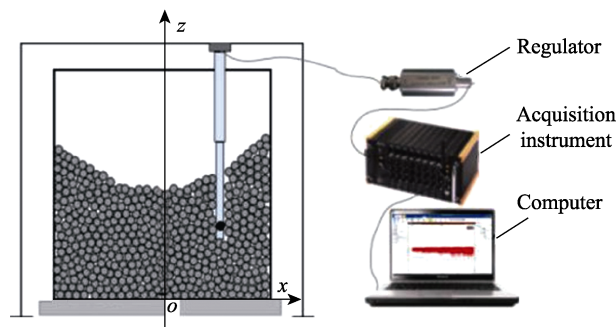
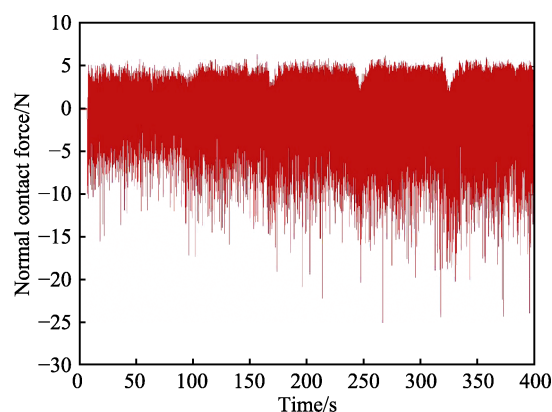


图 3 动态力测试装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of dynamic force test device

图 4 $x=70 \text{ mm}$ 、 $z=85 \text{ mm}$ 处不同转速下的去噪信号重构图Fig.4 Reconstruction of denoised signals at different speeds at $x=70 \text{ mm}$ and $z=85 \text{ mm}$

1.2 仿真模拟

1.2.1 物理性能参数的设置

滚筒、磨块以及工件的材料本征物理性能参数以及各接触体之间相互作用的相关物理性能参数见表 1。其中, 回弹系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数主要通过堆积角仿真试验标定获取^[14]。

仿真模拟时, 按正态分布设置球形颗粒半径 $R=3 \text{ mm}$, 导入几何模型, 建立颗粒工厂。设置动态生成颗粒 22 000 个, 从 $t=0$ 开始生成颗粒, 生成速度为 $10\,000$ 个/s, 初始下落速度为 -2 m/s 。当 $t=2.2 \text{ s}$ 时, 滚筒开始做回转运动。设定时间步长为 30% 的瑞利时间, 仿真时间为 5 s , 网格大小为 $2R_{\min}$, 在滚筒转速分别为 20、40、60、80 r/min 下进行仿真模拟。

1.2.2 仿真结果分析

仿真结束后, 进入 EDEM 后处理工具模块, 沿工件轴向位置建立 5 个网格, 网格中心位置与实验测试采样点中心位置一致, 每个网格的几何尺寸为 $15 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。以滚筒转速 80 r/min, 距离中心轴 55 mm 为例, 工件上网格中心位置在 $z=55 \text{ mm}$ 和 $z=70 \text{ mm}$ 处不同时刻的法向碰撞接触速度如图 5 所示。待滚筒转速稳定后, 导出滚筒各个网格在不同时刻的法向碰撞接触速度并求平均值, 见表 2。

表 1 接触介质物理性能系数

Tab.1 Physical performance coefficient of contact medium

Parameter	Value
Media density, ρ_1	2675 g/cm ³
Media poisson's ratio, μ_1	0.36
Media shear modulus, G_1	1260 MPa
Container density, ρ_2	7930 g/cm ³
Container poisson's ratio, μ_2	0.285
Container shear modulus, G_2	79 400 MPa
Workpiece density, ρ_3	7860 g/cm ³
Workpiece poisson's ratio, μ_3	0.27
Workpiece shear modulus, G_3	77 000 MPa
Media-Media static friction coefficient, f_{s1}	0.39
Media-Media rolling friction coefficient, f_{r1}	0.15
Media-Media restitution coefficient, α_1	0.46
Media-Container static friction coefficient, f_{s2}	0.35
Media-Container rolling friction coefficient, f_{r2}	0.15
Media-Container restitution coefficient, α_2	0.50
Media-Workpiece static friction coefficient, f_{s3}	0.36
Media-Workpiece rolling friction coefficient, f_{r3}	0.15
Media-Workpiece restitution coefficient, α_3	0.43

表 2 距离中心轴 $x=55$ mm 处工件轴向

不同位置处法向碰撞接触速度

Tab.2 Normal collision contact velocity at different positions ($x=55$ mm) of the workpiece to the center axis m/s

z /mm	20 r/min	40 r/min	60 r/min	80 r/min
55	0.0468	0.0837	0.1394	0.1636
70	0.0429	0.0802	0.1269	0.1522
85	0.0404	0.0766	0.1198	0.1468
100	0.0437	0.0687	0.1102	0.1387
115	0.0373	0.0592	0.0861	0.1103

2 理论分析

2.1 碰撞接触力弹性解

鉴于该研究探究的是干球形磨块与工件之间的接触作用,颗粒表面不发生黏连作用,本文基于 Hertz 碰撞理论,分析了滚抛磨块与工件之间的正面弹性碰撞接触力,运用离散元法对主轴式滚磨光整加工过程进行了分析。Hertz 在假设接触面半径为 a 的球^[15]的基础上,给出了 2 个球体在接触压力 P 作用下的弹性问题的完备解, Hertz 弹性接触模型如图 6 所示。

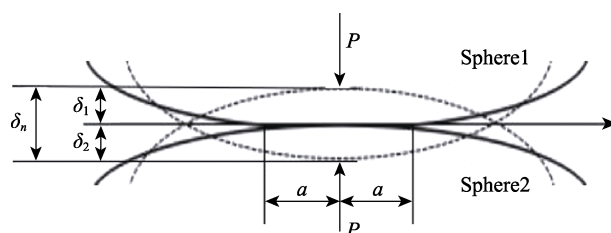


图 6 Hertz 弹性接触模型
Fig.6 Hertz elastic contact model

接触面压应力 $P(r)$ 分布公式为:

$$P(r) = \frac{2E^* R^{*1/2}}{\pi a^2} \delta_n^{3/2} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Hertz 碰撞接触力 F_n 可由式(2)、式(3)、式(4)和式(5)求出:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* R^{*1/2} \delta_n^{3/2} \quad (2)$$

$$\delta_n = \delta_1 + \delta_2 \quad (3)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

$$\frac{1}{E^*} = \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \quad (5)$$

$$a^2 = R^* \delta_n \quad (6)$$

式中: R^* 为等效颗粒半径; E^* 为等效弹性模量; δ_n 为法向重叠量; E_1 、 E_2 、 μ_1 、 μ_2 、 R_1 、 R_2 、 δ_1 、 δ_2

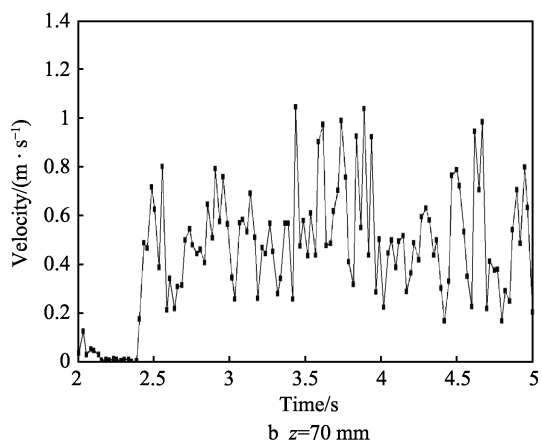
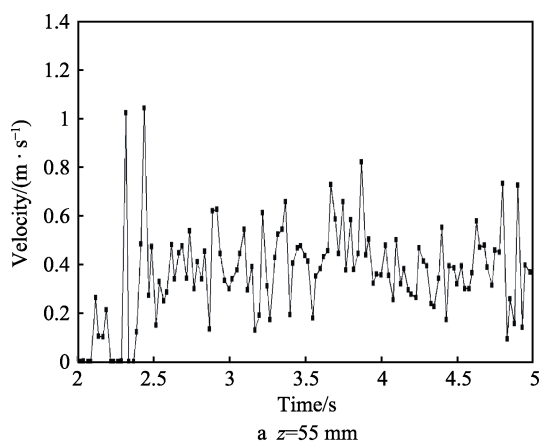


图 5 距离中心轴 $x=55$ mm 不同网格处的碰撞接触速度
Fig.5 Collision contact speed at different grids 55 mm to the center axis

分别表示两颗粒的弹性模量、泊松比、半径以及重叠量。当颗粒与平面接触时, 可将平面的半径视为无穷大。

根据 Hertz 弹性碰撞理论, 理想模型是质量为 m_1 、运动速度为 v_1 的球体与质量为 m_2 、运动速度为 v_2 的球体发生对心弹性碰撞。在主轴式滚磨光整加工中, 将滚抛磨块视为碰撞球体, 被装夹的静止工件视为被碰撞球体, 建立滚抛磨块与工件之间的碰撞模型, 如图 7 所示。

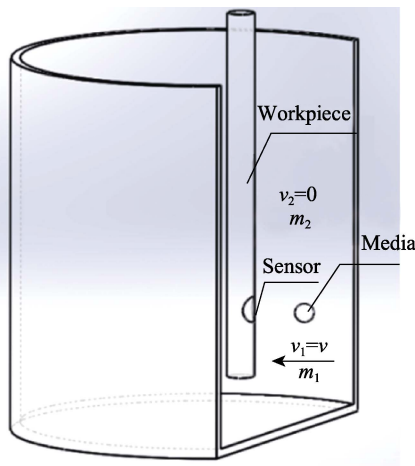


图 7 滚抛磨块与工件的碰撞模型

Fig.7 Collision model of roller-grinding media and workpiece

假设滚抛磨块与工件之间发生弹性碰撞, 且接触作用力 $F_n=F$, 根据牛顿第二定律^[16-17]可知:

$$F_n = m_1 \frac{dv_1}{dt} = m_2 \frac{dv_2}{dt} \quad (7)$$

将式(7)进行变形, 得到式(8):

$$\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} F = \frac{d(v_1 + v_2)}{dt} = \frac{d^2 \delta_n}{dt^2} \quad (8)$$

令 $m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ 为等效质量, 在准静态情况下^[18],

由式(2)与式(8)可得滚抛磨块与工件之间的碰撞接触力与接触变形的关系式为:

$$m \frac{d^2 \delta_n}{dt^2} = \frac{4}{3} E^* (R^*)^{1/2} \delta_n^{3/2} \quad (9)$$

对式(9)进行积分, 可以得到碰撞过程中的压缩量 δ_n 为:

$$\delta_n = \left(\frac{15mv^2}{16E^*R^{*1/2}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(2), 得出弹性正面碰撞接触力与碰撞接触速度之间的关系式为:

$$F_e = \frac{4}{3} E^* (R^*)^{1/2} \left(\frac{15mv^2}{16E^*R^{*1/2}} \right)^{\frac{3}{5}} a \quad (11)$$

2.2 碰撞接触力弹塑性解

事实上, 颗粒在接触过程中, 当相互接触材料的

最大接触压应力超过材料屈服强度时, 就会在接触面上产生塑性变形区。采用 Thornton 假设, 忽略材料的塑性硬化或塑性软化特性, 视碰撞系统材料为理想弹塑性材料, 材料屈服后, 塑性区内的接触压应力为一常数^[19]。理想弹塑性材料压应力分布如图 8 所示。

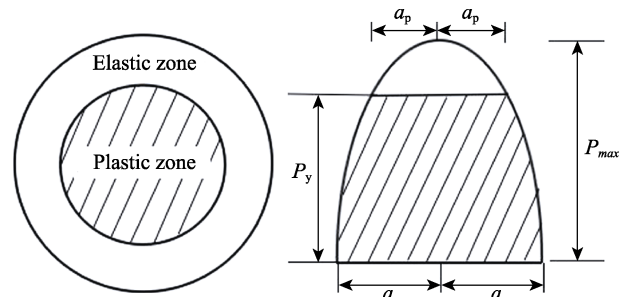


图 8 理想弹塑性材料压应力分布

Fig.8 Distribution of pressure stress of ideal elasto-plastic material

通过式(1)~(6)可以求出屈服压应力与初始屈服对应的接触半径之间的关系:

$$p_y = \frac{2Ea_y}{\pi R} \quad (12)$$

式中: p_y 为接触屈服压应力; a_y 为初始屈服对应的接触面半径。

假设在某荷载作用下, 半径为 a_p 范围内的接触面产生屈服, 而超过这一范围的接触面仍然满足 Hertz 应力分布。根据式(1)~(3)以及式(12)有:

$$a^2 = a_y^2 + a_p^2 \quad (13)$$

两碰撞接触物体之间的接触力如式(14)所示:

$$F_{cp} = \frac{4}{3} ER^{\frac{1}{2}} \delta_n^{\frac{3}{2}} - 2\pi \int_0^{a_p} [P(r) - p_y] r dr \quad (14)$$

式(14)中, p_y 、 a_p 、 $P(r)$ 三个参数未确定, 下面分别就这三个参数的取值进行分析。

1) 假设加工过程中被加工工件材料满足 Mises 屈服准则^[20], 则初始屈服应力 p_y 服从式(15)的关系:

$$p_y = (1.234 + 1.256\mu)Y \quad (15)$$

式中: μ 和 Y 分别表示被加工工件材料的泊松比和屈服强度。

2) 塑性区半径 a_p 可由式(10)、(12)、(13)求出:

$$a_p = \sqrt{R^* \left(\frac{15mv^2}{16R^{*1/2}E^*} \right)^{\frac{2}{5}} - \left(\frac{\pi R^* p_y}{2E^*} \right)^2} \quad (16)$$

3) 接触压应力 $P(r)$ 的计算公式为:

$$P(r) = \frac{2E^* R^{*1/2}}{\pi a^2} \left(\frac{15mv^2}{16R^{*1/2}E^*} \right)^{\frac{3}{5}} \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

根据式(14)、(16)、(17)可计算得出两碰撞接触物体之间的弹塑性接触力:

$$F_{ep} = \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}} \delta_n^{\frac{3}{2}} \left(\frac{a_y}{a} \right)^3 + \pi p_y a_p^2 \quad (18)$$

3 修正系数的量化

目前,对滚磨光整加工技术的研究,有关工件与滚抛磨块之间接触作用力的理论计算尚未见任何报道。陈玉楠^[21]在针对主轴式滚磨光整加工工艺的研究中发现,磨块与工件之间主要发生弹塑性碰撞。本文基于 Hertz 弹性接触力学及 Thornton 接触力学模型,将滚抛磨块与工件的接触视为弹塑性碰撞接触。鉴于固定设备加工工件时,速度与工件装夹位置作为主要影响因素,采用控制变量法,针对 6 mm 球形磨块与圆柱形工件之间的接触力进行分析研究。考虑到不同的碰撞接触速度以及不同的装夹位置对接触力大小的影响,引入修正系数 k 来考虑碰撞接触速度以及工件结构变位系数对实际接触力的影响,提出计算滚抛磨块与工件之间修正接触压力 F 的通用式(19):

$$F = k * \left(\frac{4}{3} E^* (R^*)^{1/2} \delta_n^{3/2} \right) \quad (19)$$

式中: k 为综合修正系数, $k=k_1 \times k_2$, k_1 、 k_2 分别为碰撞接触速度修正系数以及工件结构变位修正系数。

3.1 速度修正系数

在接触系统材料和尺寸一定的条件下,考虑到碰撞接触弹性解以及弹塑性解均与碰撞接触速度之间有一定关系,本文定义速度修正系数 $k_1 = \frac{F_{ep}}{F_e}$, 由式

(2)、式(12)及式(18)可得:

$$k = \frac{12\pi E^* R^{1/2} p_y \delta_n - \pi^3 R^{3/2} p_y^3}{16 E^* \delta_n^{3/2}} \quad (20)$$

结合式(10)可得:

$$k = \frac{36.7(E^* m v^2)^{2/5} R^{3/5} p_y - \pi^3 R^{9/5} p_y^3}{15.4(E^* m v^2)^{3/5}} \quad (21)$$

通过估算可知式(21)中分子前后两项数量级之比为 10^3 , 忽略后半项, 式(21)简化为:

$$k = 2.38 \frac{R^{3/5} p_y}{(E^* m v^2)^{1/5}} \quad (22)$$

综合式(15)和式(22), 得到修正系数:

$$k = 2.38 \frac{R^{3/5} (1.234 + 1.256\mu) Y}{(E^* m v^2)^{1/5}} \quad (23)$$

由式(23)可以看出, 碰撞接触力修正系数不仅与材料性质、碰撞系统对象尺寸有关, 还随着磨块与工件之间接触碰撞速度的变化而变化。本文采用控制变量法, 在碰撞系统球径比与接触材料一定的条件下, 研究碰撞接触速度影响下的修正系数范围。

结合式(19)与式(23), 计算修正之后的弹塑性接触力 F_{mep} 为:

$$F_{mep} = 2.38 \frac{R^{3/5} (1.234 + 1.256\mu) Y}{(E^* m v^2)^{1/5}} F_e \quad (24)$$

基于 Hertz 接触理论、牛顿第二定律以及 Thornton 接触力学模型, 推导出速度修正系数表达式, 速度修正系数在 0.32~0.58 之间。引入速度修正系数后, 不同转速下, 工件与滚抛磨块之间的弹塑性正面碰撞接触力计算结果与实验测试结果的对比见表 3。本文将进一步引入结构变位系数完成对式(24)的进一步修正计算。

表 3 距离中心轴 $x=55$ mm 处工件轴向不同位置处接触力实验结果和修正结果对比

Tab.3 Comparison of experimental results and correction results of contact force at different axial positions ($x=55$ mm) of the workpiece from the central axis

Z/mm	V=20 r/min		V=40 r/min		V=60 r/min		V=80 r/min	
	F_E	F_{mep}	F_E	F_{mep}	F_E	F_{mep}	F_E	F_{mep}
55	2.6904	1.1561	2.8713	1.8706	3.2318	2.7682	3.4419	3.1464
70	2.5696	1.0783	2.6405	1.7788	2.9465	2.5677	3.2196	2.9697
85	1.8994	1.0277	2.0073	1.7146	2.3384	2.4521	2.5173	2.8851
100	1.3269	1.0944	1.6036	1.5761	1.8481	2.2936	1.9491	2.7570
115	0.8130	0.9642	0.8918	1.3952	1.0231	1.8827	1.0899	2.2953

3.2 结构变位修正表达式

当滚抛磨块与工件相互作用时, 不同位置的工件会出现不同的响应。在滚磨光整加工中, 滚筒旋转带动滚抛磨块与工件之间产生相对运动, 磨块与工件表面发生低速碰撞。滚抛磨块与工件碰撞接触模型如图 9 所示。考虑不同位置处接触力作用的不同, 本文提

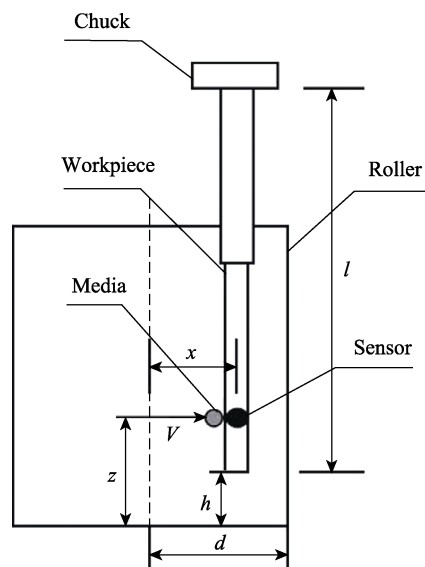


图 9 滚抛磨块与工件碰撞接触模型
Fig.9 Collide model of the roller-grinding media and the workpiece

出结构变位修正系数 k_2 来表征结构对于接触力的影响, 其表达式的选择, 需经过试算确定。

通过对表 3 中数据的计算, 得出不同转速下沿工件轴向不同位置 F_E / F_{mep} 范围在 0.50~2.41 之间 (F_E 为实验测试结果)。鉴于 k_2 是无量纲修正系数, 将 v 和 z 进行归一化处理, 定义 $v^* = v/v_{max}$, $z^* = z/z_{max}$ 。基于 Matlab, 采用 Polynomial 函数拟合结构变位系数与滚筒转速以及碰撞接触轴向中心位置之间的关系曲面如下:

$$k_2 = 3.811 - 1.039z^* - 4.442v^* - 1.24z^{*2} + 2.225z^*v^* + 1.532v^{*2} \quad (25)$$

该拟合结果的相关系数 R^2 与校正相关系数分别为 $R^2 = 0.9958$, $R^2_{Adj} = 0.9947$, 均方根误差为 0.050 51。拟合曲面如图 10 所示。

将式(25)与拟合曲面表达式结合, 得出滚抛磨块与工件之间的修正接触力 F_{mep} 的表达式为:

$$F_{mep} = (3.811 - 1.039z^* - 4.442v^* - 1.24z^{*2} + 2.225z^*v^* + 1.532v^{*2}) \cdot \frac{R^{*3/5} (1.234 + 1.256v) Y}{(E^*4 mv^2)^{1/5}} F_e \quad (26)$$

设置修正计算结果和实验结果平均接触力相对误差值为:

$$err = \left| \frac{F_E - F_{mep}}{F_E} \right| \quad (27)$$

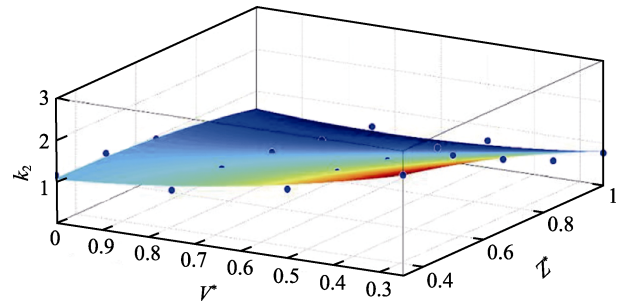


图 10 结构变位系数关系曲面

Fig.10 Structure change coefficient relational surfaces

4 实验验证分析

为验证式(26)接触力通用式的适用性, 本文通过对距离中心轴 $x=70$ 、85 mm 处的不同转速下工件不同位置处实验测试与仿真模拟碰撞接触力计算结果进行对比分析, 并结合式(27)计算相对误差, 在 0.122%~8.901%之间。结果表明, 修正之后的接触力计算公式与实验测试结果拟合效果较好, 不同转速下的拟合效果如图 11、图 12 所示。

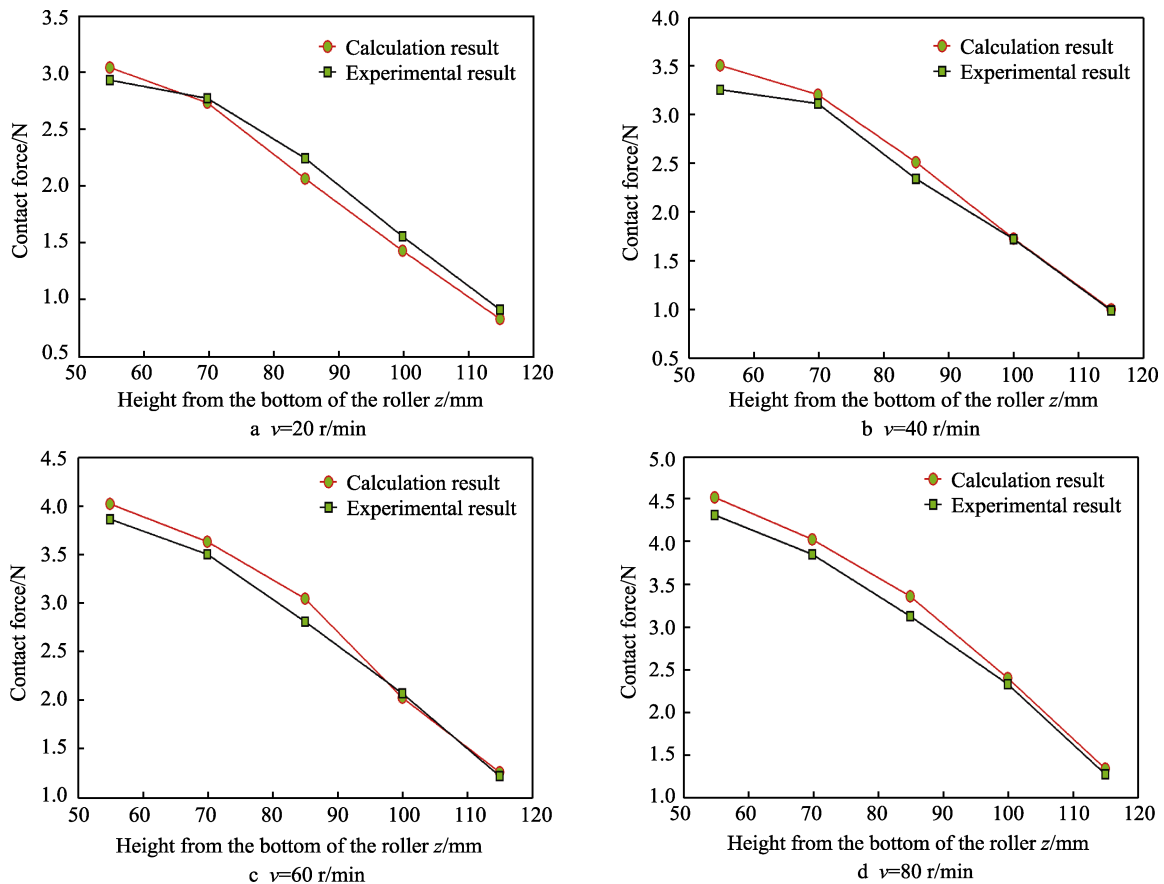


图 11 $x=70$ mm 不同转速下修正计算结果与实验结果的对比

Fig.11 Comparison between modified calculation results and experimental results at different rotational speeds at $x=70$ mm

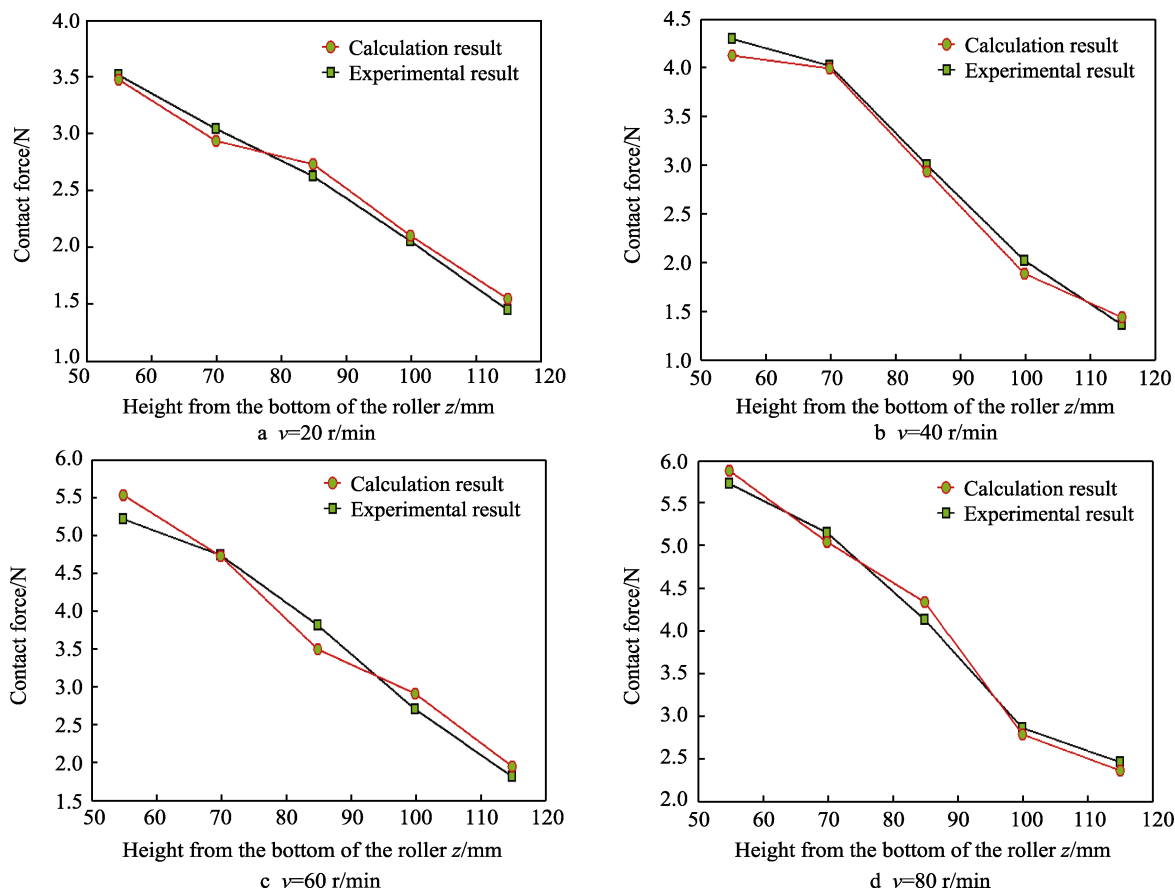
图 12 $x=85$ mm 不同转速下修正计算结果与实验结果的对比

Fig.12 Comparison between modified calculation results and experimental results at different rotational speeds at $x=85$ mm

5 结论

针对主轴式滚磨光整加工,本文利用仿真模拟和实验测试的对比分析,得出以下结论:

1) 通过对实验和仿真结果分析,滚抛磨块与工件之间的接触力均随工件埋入滚抛磨块中深度的增加而增加,随着距离滚筒中心轴距离的增大而增大。

2) 基于 Hertz 弹性接触理论以及牛顿第二定律推导出弹性碰撞接触力与接触系统的材料以及碰撞接触速度有关。本文采用控制变量法计算了滚抛磨块与工件之间的弹性碰撞接触力以及弹塑性接触力,并与实验测试数据对比分析。结果表明,直接采用 Hertz-MD 无滑移接触模型计算得出的接触力表征滚磨光整加工工艺中滚抛磨块与工件之间的接触力具有一定误差。

3) 结合 Thornton 接触力学模型,推导出速度修正系数在 0.32~0.58 之间。同时考虑结构变位修正系数,经过试算求得结构变位修正系数在 0.50~2.41 之间。基于 Matlab,采用 Polynomial 函数拟合结构变位修正表达式,最后建立了滚抛磨块与工件之间弹塑性接触力关系表达式,用于更好地反映实际接触情况。

4) 通过改变工件距离中心轴位置验证了接触力计算公式的适用性,用文中提出的接触力修正公式计

算接触力,计算结果与实验测试结果相对误差值在 0.122%~8.901%之间,较好地反映了实际工程接触状况。本文主要针对速度以及工件装夹位置进行了研究分析,并未考虑滚筒、滚抛磨块以及工件的形状尺寸、接触系统材料对弹塑性接触力修正表达式的影响,该研究工作将作为下一步的研究内容。

参考文献:

- [1] YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui. Surface finishing theory and new technology[M]. New York: Springer, 2018.
- [2] WANG Xiu-zhi, YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui, et al. Vibratory finishing co-simulation based on ADAMS-EDEM with experimental validation[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 96: 1175-1185.
- [3] RUPINDER S, ALOK T, SUNPREET S. Experimental investigation on shore hardness of barrel-finished FDM patterns[J]. Indian academy of sciences, 2017, 42(9): 1579-1584.
- [4] BOSCHETTO A, BOTTINI L, VENIALI F. Surface roughness and radiusing of Ti6Al4V selective laser melting-manufactured parts conditioned by barrel finishing[J]. Int j adv manuf technol, 2018, 94: 2773-2790.

- [5] VIKRAM C, HYUNJAE P, JONGSOO K, et al. Development of a metal removal model using spherical ceramic media in a centrifugal disk mass finishing machine[J]. *Int j adv manuf technol*, 2008, 39: 92-106.
- [6] LI Xiu-hong, WU Feng-feng, LI Wen-hui, et al. Kinematic characteristics of mass finishing process with the parallel spindle: Velocity measurement and analysis of the media[J]. *Advances in mechanical engineering*, 2017, 9(10): 1-12.
- [7] 王雪, 何立, 周开发. EDEM 及其应用研究与最新进展[J]. *科学咨询*, 2016(10): 52-54.
WANG Xue, HE Li, ZHOU Kai-fa. The application research and latest development of the EDEM[J]. *Scientific consult*, 2016(10): 52-54.
- [8] 郝志明, 李文辉, 李秀红, 等. 滚抛磨块参数对离心式滚磨光整加工过程中接触力的影响[J]. *中国科技论文*, 2017, 12(23): 2756-2760.
HAO Zhi-ming, LI Wen-hui, LI Xiu-hong, et al. Effect of media parameters on contact forces in centrifugal barrel finishing[J]. *China science paper*, 2017, 12(23): 2756-2760.
- [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 Yu, LI Wen-hui. Crankshaft barrel finishing mechanism analysis based on the discrete element method[J]. *Modern manufacturing engineering*, 2015(3): 79-83.
- [10] 闫霞. 瀑布式振动光饰设备振动系统的理论分析与仿真研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
YAN Xia. Theoretical analysis and simulation of the vibration system of the waterfall vibration finishing equipment[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [11] 宋春花. 基于三维离散元的离心式滚磨光整加工理论分析和仿真模拟[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
SONG Chun-hua. Theoretical analysis and simulation of centrifugal barrel finishing based on three-dimensional discrete element method[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [12] 陈懿. 卧式离心滚磨介质运动分析及数值模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- CHEN Yi. Motion analysis of medium and numerical simulation of horizontal centrifugal barrel finishing[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2017.
- [13] LI Wen-hui, ZHANG Li, LI Xiu-hong, et al. Theoretical and simulation analysis of abrasive particles in centrifugal barrel finishing: Kinematics mechanism and distribution characteristics[J]. *Powder technology*, 2017, 318: 518-527.
- [14] 曹波, 李文辉, 王娜, 等. 基于 JKR 模型的湿式滚抛磨块离散元参数标定[J]. *表面技术*, 2019, 48(3): 249-256.
CAO Bo, LI Wen-hui, WANG Na, et al. Calibration of discrete element parameters of the wet barrel finishing abrasive based on JKR model[J]. *Surface technology*, 2019, 48(3): 249-256.
- [15] CLAUDIO B, LUCA L. A general elastic-plastic approach to impact analysis for stress state limit evaluation in ball screw bearings return system[J]. *International journal of impact engineering*, 2007, 34(7): 1272-1285.
- [16] ADAMS G G, NOSONOVSKY M. Contact modeling—Forces[J]. *Tribology International*, 2000, 33(5): 431-442.
- [17] STRONGE W J, ASHCROFT A D C. Oblique impact of inflated balls at large deflections[J]. *International journal of impact engineering*, 2007, 34(6): 1003-1019.
- [18] JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1985.
- [19] THORNTON C, NING Z. A theoretical model for the stick/bounce behaviour of adhesive, elastic-plastic spheres[J]. *Powder technology*, 1998, 99(2): 154-162.
- [20] BRIZME R V, KLIGERMAN Y, ETSION I. The effect of contact conditions and material properties on the elasticity terminus of a spherical contact[J]. *International journal of solids and structures*, 2006, 43(18/19): 5736-5749.
- [21] 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 Yu-nan, LI Wen-hui, LI Xiu-hong, et al. Force test and analysis of abrasive in spindle barrel finishing process[J]. *China surface engineering*, 2017, 30(1): 33-40.

(上接第 315 页)

- [21] SWAMINATHAN S, SPIEGEL M. Effect of alloy composition on the selective oxidation of ternary Fe-Si-Cr, Fe-Mn-Cr model alloys[J]. *Surface & interface analysis*, 2010, 40(3-4): 268-272.
- [22] STROHMEIER B R, HERCULES D M. Surface spectroscopic characterization of manganese/aluminum oxide catalysts[J]. *The journal of physical chemistry*, 1984, 88(21): 4922-4929.
- [23] FINSTER J. SiO₂ in 6:3 (stishovite) and 4:2 coordination characterization by core level spectroscopy (XPS/XAES)[J]. *Surface and interface analysis*, 1988, 12(5): 309-314.
- [24] LIU H, HE Y, SWAMINATHAN S, et al. Effect of dew point on the surface selective oxidation and subsurface micro-structure of TRIP-aided steel[J]. *Surface and coatings technology*, 2011, 206(6): 1237-1243.
- [25] DEVAN R S, GAO S Y, LIN Y R, et al. Scanning photoemission spectromicroscopic study of 4 nm ultrathin SiO_{3.4} protrusions probe-induced on the native SiO₂ layer[J]. *Microscopy and microanalysis*, 2011, 17(6): 944-949.
- [26] TAKAO K, YASUDA A, KOBAYASHI S, et al. Effect of phosphorus on phosphatability and perforation corrosion resistance of ultra-low carbon steel sheet[J]. *Tetsu-to-hagane*, 1986, 72(10): 1582-1589.
- [27] KAVITHA C, RAVICHANDRAN K, SANKARA NARAYANAN T S N. Effect of surface mechanical attrition treatment (SMAT) on zinc phosphating of steel[J]. *Transactions of the IMF*, 2014, 92(3): 161-168.