

[新材料·新设备·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.05.012

基于 AdvantEdge 加工的 M2 高速钢 微铣削力仿真与预测

叶文珺, 钱 炜

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘 要:微织构的加工领域中常用到激光加工,但激光加工设备成本高且无法进行大规模生产,因此文中用已发展成熟的加工中心来对高速钢进行铣削加工。采用 0.3 mm 的硬质合金微小径铣刀,利用数控加工中心对 M2 高速钢进行微沟槽铣削加工;在微铣削加工中,铣削力过大会导致铣刀磨损过快影响加工质量,因此笔者利用仿真软件 AdvantEdge 对微铣削加工进行仿真;由于微细铣削不同于传统铣削,分析了刀具前角以及刀刃圆弧半径对铣削力的影响,并利用正交实验的方法,研究切削参数及刀具几何参数对铣削力的影响规律;采用 MATLAB 多元线性回归对铣削力进行预测;最后通过一组实验对预测模型进行验证。结果表明构建的模型对铣削力的预测较为准确,误差在 10% 以内。该研究方法有助于在实际加工中更高效、更便捷地选用合适的切削用量。

关 键 词:微铣削加工;M2 高速钢;切削力;AdvantEdge;多元线性回归预测;正交试验

中图分类号:TB115.7;TH161 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2022)05-0081-05

Simulation and Prediction of Micro-Milling Force of M2 High-Speed Steel Based on AdvantEdge Machining

YE Wenjun, QIAN Wei

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Laser machining, which is commonly used in micro-texture milling, cannot be produced on a large scale due to the high cost of the equipment. Therefore, mature machining center is used to mill high-speed steel. The micro-groove milling of M2 high-speed steel was carried out by CNC machining center with a 0.3 mm carbide micro-diameter milling cutter. Due to the fact that in micro-milling, the excessive milling force will cause the milling cutter to wear too quickly and affect the processing quality, the simulation software AdvantEdge was adopted to simulate micro-milling machining. Since micro-milling is different from traditional milling, the influence of the tool angle and the radius of the cutting edge arc on the milling force was analyzed. Using the method of orthogonal experiments, the influence of process parameters and tool geometry parameters on milling force was studied. MATLAB multivariate linear regression was used to predict the milling force, and finally a set of experiments were carried out to verify the prediction model. The results show that the built model can predict the milling force accurately with an error less than 10%. The research method is beneficial for selecting the suitable cutting amount more efficiently and conveniently in practical machining.

Keywords: micro-milling machining; M2 high-speed steel; cutting force; AdvantEdge; multiple linear regression prediction; orthogonal experiment

在摩擦副表面通过加工微织构来获得流体动压效应,提高摩擦副润滑性能,减少摩擦磨损。目前所加工的织构大部分采用激光加工,激光加工效率虽高,但是

现阶段只停留在实验室阶段;在本课题中,课题组决定采用加工中心,用微小径铣刀铣出凹槽。刘宇等^[1]用不同刀刃半径的微铣刀对 AL6160 工件进行铣槽,进

收稿日期:2022-04-06;修回日期:2022-07-08

第一作者简介:叶文珺(1996),女,湖北孝感人,硕士研究生,主要研究方向为微铣削加工。E-mail:120012754@qq.com

行三维仿真模拟并获取仿真切削力。折小荣^[2]用有限元分析软件 AdvantEdge 分析了切削用量和钝圆半径对 45 号钢铣削过程中刀具的温度变化。

在切削过程中切削力和切削温度会影响刀具磨损、加工精度及工件材料的性能等^[3-5]。因此研究切削用量对切削力和切削温度带给工件和刀具的影响对提高加工质量及刀具的寿命很有意义。

课题组以 M2 高速钢为被加工材料,硬质合金为铣刀材料,用 0.3 mm 的微小径铣刀加工微凹槽;通过 AdvantEdge 进行正交实验仿真,以最小铣削力为目标对结果进行分析。通过对切削力的分析,为铣削 M2 高速钢提供合适的切削用量。

1 切削模型的建立

1.1 材料参数

高速钢是高速工具钢的简称,是一种重要的刀具材料,因其在高温下也能保持它的高耐磨性,因此也用在一些重要轴承中。高速钢属于高碳高合金莱氏体钢,由于其独特的合金成分和后续的热处理工艺而使其具有优异的综合力学性能。热处理后,高速钢可以获得很高的硬度(HRC63~70)和高耐磨性,当温度达到 500~600℃时,仍然能保持高硬度。M2 高速钢的成分及力学性能如表 1 和表 2 所示。

表 1 M2 高速钢化学成分

Table 1 Chemical composition of M2 high-speed steel

| % | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C | Mn | Si | Cr |
| 0.80~0.90 | 0.15~0.40 | 0.20~0.45 | 0.38~0.44 |
| V | W | Mo | |
| 1.75~2.20 | 5.50~6.75 | 4.50~5.50 | |

表 2 M2 高速钢力学性能

Table 2 Mechanical properties of M2 high-speed steel

| 弹性模量 E/GPa | 泊松比 ν | 密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3})$ |
|--|--|--|
| 200 | 0.33 | 7 870 |
| 比热容 $C_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$ | 导热系数 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1})$ | 熔点温度 $T/°\text{C}$ |
| 0.477 | 44.5 | 1 520 |

1.2 材料本构方程

材料的本构方程反映工程材料在切削中的应力应

变及应变率随温度的变化。本构模型有很多种,如 Johnson-Cook 模型、Zerilli-Armstrong 模型、Drucker-Prager 模型和 Power-Law 模型等。由于 Johnson-Cook 模型参数较少,模型结构简单,笔者选择 Johnson-Cook 模型,其本构方程为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^t) [1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0})] [1 - (\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}})^m] \quad (1)$$

式中: A 为屈服应力,MPa; B 为加工硬化模量,MPa; C 为应变敏感系数; t 为硬化系数; m 为材料热软化系数; T_{melt} 为材料熔点,°C; T_{room} 为室内温度,°C; ε 为应变; ε_0 为参考应变。

A, B, C, m 和 t 为 5 个待定的材料参数。其中: A, B 和 t 是材料应变强化项的系数,其值越大表示材料硬化程度就越高; C 表示材料的应变速率强化项的系数,反映的是流变应力受应变速率影响的程度; m 反映材料流变应力对温度变化的敏感程度。式(1)中等号右边的 3 个式子分别表示材料的应变强化效应、材料的应变速率强化效应以及材料的热软化效应。查阅文献^[6]可知 A, B, C, m 和 t 5 个模型参数的数值如表 3 所示。

表 3 J-C 本构方程参数

Table 3 J-C constitutive equation parameters

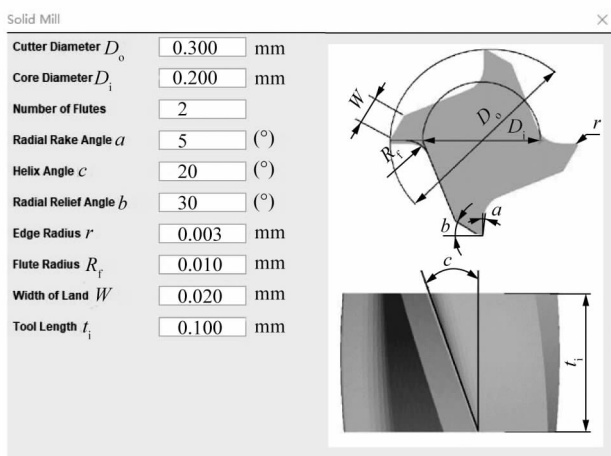
| A/GPa | B/GPa | t | C | m |
|----------------|----------------|-------|-------|------|
| 375 000 | 552 000 | 0.457 | 0.014 | 1.03 |

1.3 仿真软件参数设置

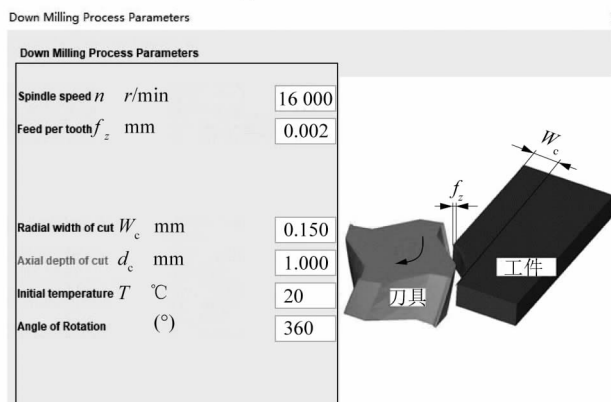
利用仿真软件 AdvantEdge,建立三维铣削模型。由于采用微铣削,设置的铣削径向宽度为 0.3 mm,刀具直径 0.3 mm,刀刃半径 0.001~0.004 mm,刀刃前角 5°~8°。刀具材料选择硬质合金,工件材料为 M2 高速钢,初始温度为 20℃,铣削模型如图 1 所示。

2 正交实验

影响铣削力的因素很多,大部分会考虑切削 3 要素,但由于微铣削不同于传统切削,当刀刃圆弧半径小于切削厚度时,切削过程中不产生切屑而是对被加工表面进行挤压;而刀具前角也影响着切削的难易程度,间接影响切削力,因此也是需要考虑的因素。为了减



(a) 微铣刀参数



(b) 工艺切削参数

图 1 铣削仿真参数设置

Figure 1 Milling simulation parameter settings

少试验次数,达到与大量全面试验等效的实验结果,因而采用正交实验。本实验为 5 因素(主轴转速、每齿进给、轴向切深、刀刃半径、刀具前角)4 水平的正交实验,由于轴向的切削力较小,省略不计,只研究径向的 2 个方向的切削力,通过 AdvantEdge 仿真软件得到切削力 F_x 和 F_y ,如表 4 所示^[7-10]。

对以上正交表,用 Minitab 分析田口得到如表 5 所示的均值响应表。 δ 值的计算原则是:通过对因子取最大和最小特征平均数之差来测量效应的大小。表 5 中的秩有助于快速确认哪些因子的效应最大^[11-12]。给予 δ 值最大的因子以秩 1,给予 δ 值第 2 大的因子以秩 2,依此类推。从表 5 可以看出,对铣削力的影响大小为:切削深度 > 每齿进给 > 主轴转速 > 刀具前角 > 刀刃圆弧半径。再用多响应预测分析得到最优解如表 6 所示。切削力最小的组合为:主轴转速 18 000 r/

min,每齿进给 0.001 mm,切削深度 0.01 mm,刀刃圆弧半径 0.004 mm,刀具前角 8°。并预测最优解的铣削力 F_x 和 F_y 。

表 4 正交实验结果统计表

Table 4 Statistical table of orthogonal experimental results

| 组号 | 主轴转速/ ($r \cdot \min^{-1}$) | 每齿进 给/mm | 切削深 度/mm | 刀刃圆弧 半径/mm | 刀具前 角/(°) | 铣削力 F_x/N | 铣削力 F_y/N |
|----|----------------------------------|-------------|-------------|---------------|--------------|----------------|----------------|
| | A | B | C | D | E | | |
| 1 | 12 000 | 0.001 | 0.01 | 0.001 | 5 | 0.50 | 0.40 |
| 2 | 12 000 | 0.002 | 0.02 | 0.002 | 6 | 0.54 | 0.50 |
| 3 | 12 000 | 0.003 | 0.03 | 0.003 | 7 | 0.68 | 0.55 |
| 4 | 12 000 | 0.004 | 0.04 | 0.004 | 8 | 0.85 | 0.77 |
| 5 | 14 000 | 0.001 | 0.02 | 0.003 | 8 | 0.47 | 0.39 |
| 6 | 14 000 | 0.002 | 0.01 | 0.004 | 7 | 0.51 | 0.46 |
| 7 | 14 000 | 0.003 | 0.04 | 0.001 | 6 | 0.60 | 0.57 |
| 8 | 14 000 | 0.004 | 0.03 | 0.002 | 5 | 0.72 | 0.67 |
| 9 | 16 000 | 0.001 | 0.03 | 0.004 | 6 | 0.47 | 0.38 |
| 10 | 16 000 | 0.002 | 0.04 | 0.003 | 5 | 0.71 | 0.56 |
| 11 | 16 000 | 0.003 | 0.01 | 0.002 | 8 | 0.44 | 0.42 |
| 12 | 16 000 | 0.004 | 0.02 | 0.001 | 7 | 0.61 | 0.47 |
| 13 | 18 000 | 0.001 | 0.04 | 0.002 | 7 | 0.62 | 0.46 |
| 14 | 18 000 | 0.002 | 0.03 | 0.001 | 8 | 0.63 | 0.52 |
| 15 | 18 000 | 0.003 | 0.02 | 0.004 | 5 | 0.48 | 0.42 |
| 16 | 18 000 | 0.004 | 0.01 | 0.003 | 6 | 0.44 | 0.39 |

表 5 均值响应表

Table 5 Mean Response Table

| 水平 | 响应值 | | | | |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | A | B | C | D | E |
| 1 | 0.598 8 | 0.461 2 | 0.445 0 | 0.537 5 | 0.557 5 |
| 2 | 0.548 8 | 0.553 7 | 0.485 0 | 0.546 3 | 0.486 3 |
| 3 | 0.507 5 | 0.520 0 | 0.577 5 | 0.523 7 | 0.545 0 |
| 4 | 0.495 0 | 0.615 0 | 0.642 5 | 0.542 5 | 0.561 3 |
| δ | 0.103 8 | 0.153 7 | 0.197 5 | 0.022 5 | 0.075 0 |
| 排序 | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 |

3 多元线性回归模型的建立

课题组采用指数形式的切削力与切削参数之间的关系式为:

$$F = \varepsilon \cdot n^{n_1} \cdot f_z^{n_2} \cdot a_p^{n_3} \cdot r^{n_4} \cdot \gamma^{n_5} \quad (2)$$

式中: ε 为总修正系数, a_p 为轴向切削深度, n 为主轴转速, f_z 为每齿进给量, r 为刀刃半径, γ 为刀具前角。

对式(2)的 2 边求对数,可得:

$$\ln F = \ln \varepsilon + n_1 \ln n + n_2 \ln f_z + n_3 \ln a_p + n_4 \ln r + n_5 \ln \gamma \quad (3)$$

表6 多响应预测

Table 6 Multi-response projections

| 设置 | | | | | 响应 | |
|------------------------------|---------|---------|-----------|-------------------|-----------|-----------|
| 主轴转速/($r \cdot \min^{-1}$) | 每齿进给/mm | 切削深度/mm | 刀刃圆弧半径/mm | 刀具前角/($^\circ$) | F_x/N | F_y/N |
| 18 000 | 0.001 | 0.01 | 0.004 | 8 | 0.403 762 | 0.334 996 |

令 $Y = \ln F$, $b = \ln \varepsilon$, $X_1 = \ln n$, $X_2 = \ln f_z$, $X_3 = \ln a_p$, $X_4 = \ln r$, $X_5 = \ln \gamma$, 式(3)可写为:

$$Y = b + n_1 X_1 + n_2 X_2 + n_3 X_3 + n_4 X_4 + n_5 X_5 \quad (4)$$

式(4)为多元线性方程,把表4中的数据代入式(4),用MATLAB算出各系数,可得:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= 99.48 \cdot n^{-0.38} \cdot f_z^{0.12} \cdot a_p^{0.27} \cdot r^{0.03} \cdot \gamma^{0.04}; \\ F_y &= 483 \cdot n^{-0.52} \cdot f_z^{0.2} \cdot a_p^{0.24} \cdot r^{-0.01} \cdot \gamma^{0.05} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

表7为该数学预测模型的模型统计表。其中包括 R^2 统计量、 F 统计量、 P 值以及误差方差 K 的估计值。 R^2 值代表模型的拟合程度,表明2个方向的铣削力拟合程度都在70%以上, P 值都小于0.05,拟合效果显著。将表6多响应预测的最优解代入式(5),得到拟合值 $F_x = 0.27$, $F_y = 0.28$,取拟合后的铣削力值。

表7 模型统计表

Table 7 Table of model statistics

| 名称 | R^2 | F 值 | P 值 | K |
|-----------|-------|-------|---------|-------|
| 铣削力 F_x | 0.75 | 6.11 | 0.007 6 | 0.015 |
| 铣削力 F_y | 0.82 | 9.13 | 0.001 7 | 0.011 |

4 M2 高速钢微铣削实验

4.1 实验设计

试样选用 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的六面体 M2 型的高速钢,硬度为 HRC 60 ~ 63,0.3 mm 的硬质合金微小径铣刀,刀刃半径 0.004 mm,前角 5° 。装夹时夹头离微小径铣刀的刀头近一些,使悬臂刀刃尽可能小。为了保证切削中的平稳,需要保证工件的平面度,采用磁吸底座吸附工件,磁吸底座每平方厘米可吸附 250 N 的力,并将 Kistler 9347C 测力仪放在磁吸底座下面,在数控机床床上采用全径铣削加工铣槽。实验中采用型号为 FANUC ROBODRILL 的加工中心,主轴最高转速为 24 000 r/min。实验设备如图 2 所示。

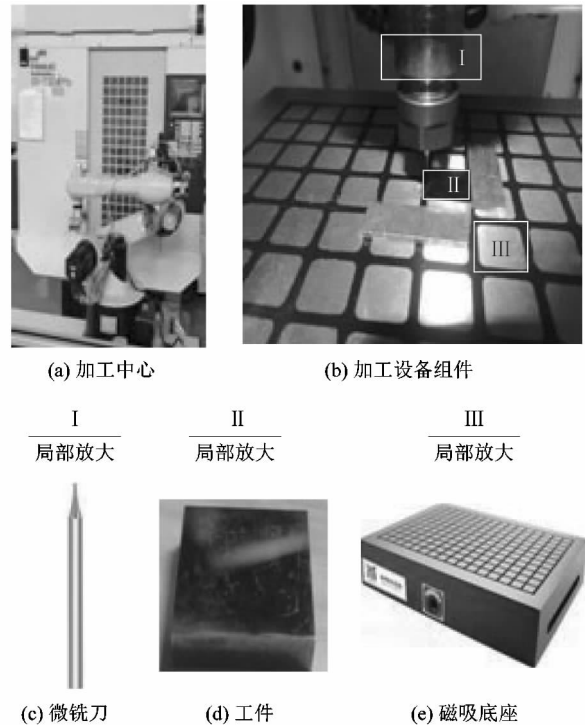


图2 实验设备

Figure 2 Experimental equipment

4.2 实验结果及对比

对上文中数学模型预测的最佳参数以及正交实验中所选最佳一组参数进行实验验证,选用表4正交实验第15组的参数,以及根据预测模型式(5)和多响应预测的最优解分析得到的铣削力。实验中每组数据测3次,取平均值,得到如表8所示的结果。从表8中可以看出,实验值和仿真预测值误差在10%以内,可以有效预测铣削力。

5 结论

课题组基于 AdvantEdge 建立了 M2 高速钢微沟槽铣削三维模型,设计了1组5因素4水平的正交实验,用得到的仿真结果建立了1个多元线性回归的预测模型: $F_x = 99.48 \cdot n^{-0.38} \cdot f_z^{0.12} \cdot a_p^{0.27} \cdot r^{0.03} \cdot \gamma^{0.04}$; $F_y = 483 \cdot n^{-0.52} \cdot f_z^{0.2} \cdot a_p^{0.24} \cdot r^{-0.01} \cdot \gamma^{0.05}$ 。用多元线性回

表 8 实验数据与仿真预测数据对比

Table 8 Comparison of experimental data with simulation prediction data

| 主轴转速/ ($r \cdot \min^{-1}$) | 每齿进 给/mm | 切削深 度/mm | 刀刃圆弧 半径/mm | 刀具前 角/ $(^\circ)$ | F_x/N | | F_y/N | | 平均误差/% |
|----------------------------------|-------------|-------------|---------------|----------------------|---------|------|---------|------|--------|
| | | | | | 仿真预测 | 实验 | 仿真预测 | 实验 | |
| 18 000 | 0.003 | 0.02 | 0.004 | 5 | 0.48 | 0.43 | 0.42 | 0.45 | 9.14 |
| 18 000 | 0.001 | 0.01 | 0.004 | 5 | 0.27 | 0.31 | 0.28 | 0.29 | 8.17 |

归方程预测铣削力的大小,经实验验证,仿真构建的预测模型可以较准确地预测铣削力,误差在 10% 以内。本研究表明工艺参数对铣削力的影响大小为:切削深度 > 每齿进给 > 主轴转速 > 刀具前角 > 刀刃圆弧半径。在加工过程中为了得到小的切削力,应选择小的切削深度,小的每齿进给量,小的刀刃圆弧半径,高的转速以及大的刀具前角。大多数微铣削都是自己搭建平台的高转速铣削,本研究是在通用机床上进行微铣削,对转速为 12 000 ~ 18 000 r/min 的微铣削具有一定的参考价值;同时对微沟槽加工选择合适的工艺参数提供了借鉴。但本研究并未考虑加工过程中刀具的磨损对刀具参数的影响,今后可进一步开展研究。

参考文献:

- [1] 刘宇,别海楠. 6160 铝合金微铣削切削力仿真与预测[J]. 工具技术, 2016, 50(12): 29-35.
- [2] 折小荣. 切削用量和钝圆半径对铣削 45 号钢的温度研究[J]. 现代机械, 2015(5): 22-24.
- [3] 贾秀杰. 刀具钝化对切削力及表面粗糙度的影响[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(7): 1431-1434.
- [4] 曾祥国,盛鹰,韩梯信,等. 考虑热粘塑性钛合金动态本构关系及

其试验验证[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(6): 152-157.

- [5] 陈德根,于福权. 基于激光辅助的氮化硅陶瓷车削表面质量研究[J]. 机电工程, 2020, 37(4): 394-398.
- [6] MEBRAHITOM A, CHOON W, AZMIR A. Side milling machining simulation using finite element analysis: prediction of cutting forces[J]. Materialstoday: Proceedings, 2017, 4(4): 5217.
- [7] 严广和,姜晨,张勇斌,等. 50 μm 级 D 形硬质合金微铣刀铣削纯铜试验研究[J]. 电子科技, 2021, 34(1): 36-42.
- [8] KIM G M, CHU C N. Mean cutting force prediction in ball-end milling using force map method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146(3): 303-310.
- [9] TAI C C, FUH K H. A predictive force model in ball-end milling including eccentricity effects[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1994, 34(7): 959-979.
- [10] KIM G M, CHO P J, CHU C N. Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(2): 277-291.
- [11] 曾林林,周利平,张敬志. 基于 AdvanEdge FEM 的车刀参数优化试验研究[J]. 工具技术, 2015, 49(12): 49-52.
- [12] 韩邦磊. 基于多元线性回归模型的工业报警根源分析[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020: 10-15.

(上接第 80 页)

- [2] 史翔. 航空柱塞泵配流盘结构优化分析[J]. 机床与液压, 2015, 43(22): 59.
- [3] 潘阳,李毅波,黄明辉. 双联轴向柱塞泵配流盘优化与流量脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 392.
- [4] 严璐,廉自生,李永康. 高速径向柱塞泵配流阀的动态特性与结构优化研究[J]. 机电工程, 2020, 37(8): 906-910.
- [5] EDGE K A, DARLING J. The pumping dynamics of swash plate piston pumps[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1989, 111(2): 307-312.
- [6] MANRING N D. Valve plate design for an axial piston pump operating at low displacements[J]. Journal of Mechanical Design-Transactions of the ASME, 2003, 125(1): 200-205.
- [7] XU B, ZHANG J H, YANG H Y, et al. Investigation on the radial micro-motion about piston of axial piston pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(2): 325-333.

- [8] BERGADA J M, HAYNES J M, WATTON J. Leakage and groove pressure of an axial piston pump slipper with multiple lands[J]. Tribology Transactions, 2008, 51(4): 469-482.
- [9] BERGADA J M, WATTON J, KUMAR S. Pressure flow, force and torque between the barrel and port plate in an axial piston pump[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2008, 130(1): 1-16.
- [10] XU B, ZHANG J H, YANG H Y. Simulation research on distribution method of axial piston pump utilizing pressure equalization mechanism[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2013, 227(3): 459-469.
- [11] SEENIRAJ G K, IVANYSNOVA M. Impact of valve plate design on noise, volumetric efficiency and control effort in an axial piston pump[C]. ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Chicago: ASME, 2006: 77-84.