

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.028

# 铣削灰铸铁 HT250 刀具磨损机制的有限元仿真研究

程格<sup>1</sup>, 裴新军<sup>1</sup>, 林良鹏<sup>2</sup>

(1. 阳江职业技术学院 机电系, 广东 阳江 529566;

2. 粤德合作阳江职业教育与培训中心, 广东 阳江 529932)

**摘要:**为研究灰铸铁 HT250 切削性能及刀具磨损机制, 基于 DEFORM-3D 有限元仿真软件, 建立铣削灰铸铁 HT250 的有限元模型。通过设计单因素实验和正交实验以及分析仿真切削过程得出的结果表明: 刀具的磨损主要发生在前刀面靠近切削刃处且在此产生月牙洼, 月牙洼宽度较窄, 边界呈锯齿形。刀具磨损量会随着切削参数的增大而增大, 其中进给量对其影响最为显著, 其次是切削速度, 而切削深度影响最小因此在保证加工精度和性能需求的前提下, 可通过适当增大切削深度来提升生产效率。

**关键词:**灰铸铁 HT250; 有限元; 刀具磨损; 切削参数

**中图分类号:** TG506; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0145-05

## Research on Tool Wear Mechanism of Milling Gray Cast Iron HT250 Based on Finite Element Simulation

CHENG Ge<sup>1</sup>, PEI Xinjun<sup>1</sup>, LIN Liangpeng<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Yangjiang Polytechnic, Yangjiang 529566, China;

2. Yuede Cooperative Yangjiang Vocational Education and Training Center, Yangjiang 529932, China)

**Abstract:** To investigate the cutting performance and tool wear mechanism of gray cast iron HT250, a finite element model of milling gray cast iron HT250 was established using the DEFORM-3D finite element simulation software. Through the design of single factor experiment and orthogonal experiment and the analysis of the simulation cutting process, the results indicate that tool wear mainly occurs at the rake face near the cutting edge, resulting in the generation of a serrated boundary crater with a narrow width. Tool wear increases with higher cutting parameters. The feed rate has the greatest influence, followed by the cutting speed, and the cutting depth has the least influence. Therefore, on the promise of ensuring machining accuracy and performance requirements, appropriate increasing cutting depth will improve production efficiency.

**Keywords:** gray cast iron HT250; finite element; tool wear; cutting parameters

## 0 引言

在金属切削过程中, 如何延长切削刀具的寿命、防止刀具过早、过多磨损已成为制造业的一大难题, 其中切削参数是影响刀具磨损很重要的因素<sup>[1-3]</sup>。灰铸铁 HT250 由于具有良好的减震、耐热、耐磨等优点, 广泛应用于机床床身、汽缸、箱体等结构件。因此探究铣削灰铸铁 HT250 切削参数对刀具磨损的影响具有非常重要的理论和现实意义。

由于有限元技术及软件的快速发展, 有限元仿真模拟技术在切削加工刀具磨损方面得到了很大的应用。吕娜<sup>[4]</sup>利用 ABAQUS 软件进行切削钛合金过程仿真, 研究硬质合金刀具磨损以及不

同切削参数影响刀具磨损的规律, 并进行实验验证, 实验和仿真结果趋于一致。焦丹丹等<sup>[5]</sup>将有限元仿真软件应用于复合材料 SiCp/Al 刀具磨损和切削温度方面的研究。于晓琳等<sup>[6]</sup>使用 DEFORM-3D 软件对高强度钢的铣削过程开展有限元仿真模拟, 研究得到了刀具磨损形貌特征及铣削用量对刀具磨损的影响规律。OKOKPUJIE 等<sup>[7]</sup>研究不同的切削用量及润滑条件下切削铝合金刀具磨损情况。CAPPELLINI 等<sup>[8]</sup>研究 PCBN 刀具车削 AISI521000 淬硬钢时刀具磨损情况, 并分析了切削参数对刀具磨损率的影响。综上所述, 国内外学者对刀具磨损的研究多集中在切削对象为钛合金、铝合金等难加工材料, 对灰铸铁 HT250 的研究目前主要侧重于提升其强度、组织

**基金项目:** 广东省普通高校青年创新人才类项目 (2022KQNCX262); 阳江职业技术学院科研项目 (2022kjb006)

**第一作者简介:** 程格 (1991—), 女, 河南新乡人, 讲师, 硕士, 研究方向为先进加工技术研究, 765617215@qq.com。

和性能<sup>[9-11]</sup>,对切削灰铸铁 HT250 的切削加工机制及刀具磨损研究明显不足。

基于金属切削加工原理、有限元仿真、数值分析等方法,建立铣削灰铸铁 HT250 的仿真模型,探讨不同切削参数影响刀具磨损的规律及刀具磨损的形貌,为铣削灰铸铁 HT250 参数的选择提供理论支持。

## 1 有限元铣削仿真模型建立

### 1.1 工件和刀具模型

有限元模拟仿真的工件形状为长方体,尺寸为 5 mm×3 mm×2 mm。刀片材料为 YG8,刀片直径为 5 mm,前角为 5°,后角为 5°,负倒棱 0.1×-10°,刃口钝圆半径为 0.003 mm,设置刀片旋转直径为 8 mm。利用 SolidWorks 软件建立工件和刀具模型,因为刀柄和刀杆不参与仿真切削,故只绘制工件和刀片的三维模型并将其导入有限元软件中。工件和刀具的物理和力学性能如表 1<sup>[12-13]</sup>所示,划分网格后的有限元模型如图 1 所示。

表 1 工件和刀具的物理和力学性能表

| 参数                        | 工件      | 刀具      |
|---------------------------|---------|---------|
| 密度/(kg/m <sup>3</sup> )   | 7 190   | 14 600  |
| 弹性模量/MPa                  | 126 000 | 580 000 |
| 泊松比                       | 0.26    | 0.22    |
| 热膨胀系数/10 <sup>-6</sup> /K | 11.0    | 4.5     |
| 热导率/(W/m·K)               | 48.10   | 75.36   |

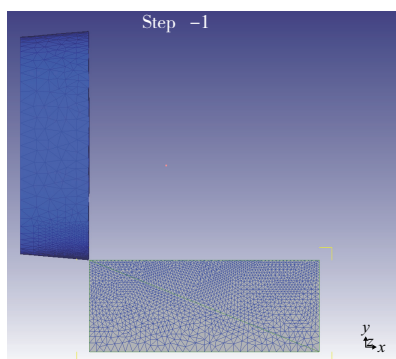


图 1 有限元模型

### 1.2 有限元关键技术

1) 本构模型:有限元仿真工件采用 Johnson-Cook 模型作为材料流动应力模型,具体模型可表示为<sup>[14]</sup>

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为流动应力; $\varepsilon$  为塑性应变; $\dot{\varepsilon}$  为应变率; $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变率; $m$ 、 $n$  分别为温度应变率敏感度和强化指数; $T$ 、 $T_{\text{melt}}$ 、 $T_{\text{room}}$  分别为工件温度、材料熔点和室温(℃); $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为屈服强度、硬化模量、应变率敏感系数,其中,参数取值  $A=573$  MPa,  $B=380$  MPa,  $C=0.034$ ,  $n=0.17$ ,  $m=1.12$ <sup>[15]</sup>。

2) 磨损模型:在 DEFOMR 软件包含 Usui 模型和 Archard 模型两种刀具磨损模型。本文采用 Usui 模型,该公式可表示为<sup>[16]</sup>:

$$w = \int a p V e^{\frac{-b}{T}} dt \quad (2)$$

式中: $V$  为相对滑移速度; $p$  为正压力; $a$ 、 $b$  分别为实验所得系数,本文  $a$  值取  $1 \times 10^{-7}$ ,  $b$  值取 855<sup>[17]</sup>;  $T$  为接触面绝对温度。

3) 摩擦模型:本文应用 DEFORM-3D 软件是基于库伦摩擦模型建立仿真分析,其方程表达为<sup>[18]</sup>

$$\begin{cases} T_f = \mu \sigma_n, & \mu \sigma_n < \bar{\tau}_s \text{ (滑移区)} \\ T_f = \bar{\tau}_s, & \mu \sigma_n \geq \bar{\tau}_s \text{ (粘结区)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_f$  为摩擦应力; $\sigma_n$  为法向应力; $\bar{\tau}_s$  为极限剪应力; $\mu$  为摩擦因数,取 0.2。

## 2 单因素实验方案及结果分析

### 2.1 单因素实验方案

为了观察切削参数对刀具磨损的影响规律,采用单因素实验法进行实验设计。将切削速度  $v_c$ 、进给量  $f$ 、切削深度  $a_p$  作为影响实验因素,铣削宽度  $a_e$  取 2 mm。实验因素及编码取值如表 2 所示。单因素实验方案及结果如表 3 所示,表中刀具磨损深度值 VB 选取刀具切削仿真时旋转 5 转的磨损结果。

表 2 单因素实验编码及水平

| 实验因素                | 编码水平  |      |       |       |        |
|---------------------|-------|------|-------|-------|--------|
|                     | 1     | 2    | 3     | 4     | 5      |
| 切削速度 $v_c$ /(m/min) | 50.24 | 62.8 | 75.36 | 87.92 | 100.48 |
| 进给量 $f$ /(mm/rev)   | 0.10  | 0.15 | 0.20  | 0.25  | 0.30   |
| 切削深度 $a_p$ /mm      | 1.00  | 1.25 | 1.50  | 1.75  | 2.00   |

表3 单因素实验方案及结果

| 实验序号 | 切削速度 $v_c/(m/min)$ | 进给量 $f/(mm/rev)$ | 切削深度 $a_p/mm$ | 刀具磨损深度 $VB/\mu m$ |
|------|--------------------|------------------|---------------|-------------------|
| 1    | 50.240             | —                | —             | 0.651             |
| 2    | 62.800             | —                | —             | 0.872             |
| 3    | 75.360             | 0.200            | 1.500         | 0.916             |
| 4    | 87.92              | —                | —             | 1.22              |
| 5    | 100.48             | —                | —             | 1.40              |
| 6    | —                  | 0.100            | —             | 0.543             |
| 7    | —                  | 0.150            | —             | 0.798             |
| 8    | 75.36              | 0.20             | 1.500         | 0.916             |
| 9    | —                  | 0.25             | —             | 1.32              |
| 10   | —                  | 0.30             | —             | 1.74              |
| 11   | —                  | —                | 1.00          | 0.616             |
| 12   | —                  | —                | 1.250         | 0.737             |
| 13   | 75.36              | 0.20             | 1.500         | 0.916             |
| 14   | —                  | —                | 1.75          | 1.19              |
| 15   | —                  | —                | 2.00          | 1.34              |

## 2.2 切削参数对刀具磨损影响规律分析

切削速度  $v_c$  对刀具磨损深度的影响规律如图2所示。随着切削速度的增大,刀具磨损的深度也增大,且刀具磨损深度的增幅呈现先减小后增大,然后呈现再次减小趋势。由于刚切削时切削温度从室温逐步增大,故刀具磨损的增幅不大。随着切削速度的增大,单位时间内刀具与工件、切屑的接触次数也增大,瞬间产生的切削热不能被及时带走,刀具与切屑之前由滑动接触转为粘接接触,刀具磨损加快。

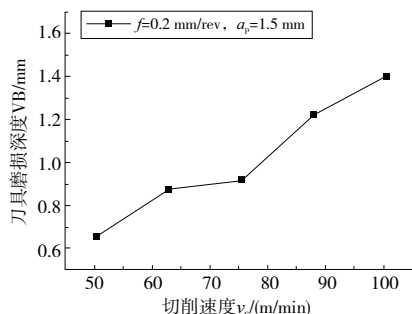


图2 切削速度对刀具磨损深度影响规律

进给量  $f$  对刀具磨损深度的影响规律如图3所示。随着进给量的增大,刀具磨损增大,刀具磨损深度增幅先减小后增大,并且当  $f$  大于

0.20 mm/rev时,刀具磨损深度保持直线增加。若每齿进给量增大,切削力也将增大,挤压和摩擦加剧,切削温度急剧增加。温度的急剧升高使刀具材料软化,最终导致刀具磨损加剧。

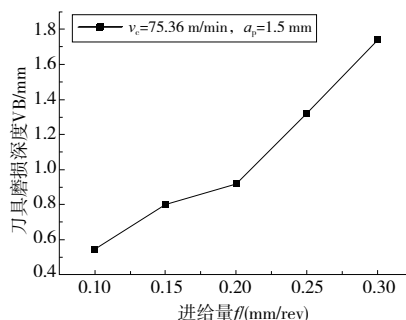


图3 进给量对刀具磨损深度影响规律

切削深度对刀具磨损的影响规律如图4所示。刀具磨损深度随着切削深度的增大而增大,并且增幅呈现先逐步增大后减小。这是由于随着切削深度的增大,每单位时间内去除的工件体积增加,导致刀具受到的压力及与切屑之间的摩擦随之增大,进而产生的切削热及刀具磨损逐渐增大。然而,当切削深度继续增大时,切屑厚度也相应增大,这时带走的切削热也响应增加,因此切削温度的增幅逐渐减小,对应刀具磨损量也逐渐减小。

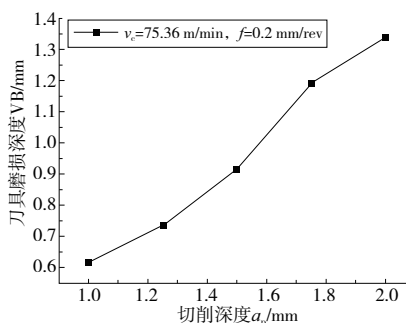


图4 切削深度对刀具磨损深度影响规律

## 2.3 刀具磨损性形貌分析

图5为切削速度  $v_c = 75.36 m/min$ , 进给量  $f = 0.2 mm/rev$ , 切削深度  $a_p = 1.5 mm$  时不同仿真步数刀具磨损形貌及磨损深度结果。图5(a)—图5(f)分别是刀具旋转第1转到第6转刀具磨损形貌图。图6为刀具旋转第1转到第6转刀具磨损深度走势图。

刀具开始切入工件时,工件网格产生变形,变形达到一定程度后失效,并成为切屑移出。刀具在切削力及与工件、切屑摩擦力等作用下开始产

生磨损,磨损量较小。随着切削继续,持续的切削力及刀具不断受到切屑的冲击摩擦作用下,刀具磨损面积不断增加,磨损量越来越大。由于刀具后角为 $5^{\circ}$ ,因此刀具磨损主要发生在前刀面靠近切削刃处,后刀面磨损量较小。图 5(e)中在靠近切削刃的刀具前刀面产生月牙洼,随着切削的继续,月牙洼面积不断增大,宽度较窄且边界呈锯齿形如图 5(f)所示。

通过图 6 分析可知,刀具前 5 转磨损量增幅速度较小,第 6 转磨损量增幅较大。刚开始由于负倒棱的作用延缓切屑对前刀面的磨损,故刀具磨损量增幅速度较小。随着切削刃不断被磨损,并且第五转开始形成月牙洼,因此磨损加剧。综合对比图 5 和图 6 可知,刀具磨损形貌和刀具磨损量走势基本一致。

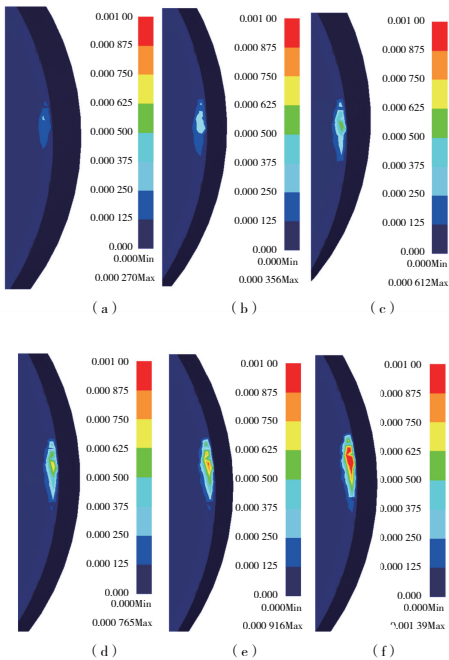


图 5 刀具磨损形貌及磨损深度结果

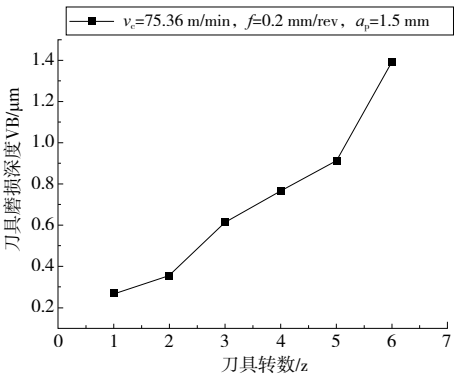


图 6 刀具磨损深度走势图

3 正交实验方案及结果分析

3.1 正交实验方案及结果

为了分析切削参数的变化对刀具磨损指标的影响大小和切削参数间水平的优劣,利用  $L_9(3^4)$  正交实验表设计正交实验。3 个因素和 3 个水平的值如表 4 所示,正交实验结果如表 5 所示。

表 4 正交实验编码及水平

| 实验因素               | 编码水平  |       |        |
|--------------------|-------|-------|--------|
|                    | 1     | 2     | 3      |
| 切削速度 $v_c/(m/min)$ | 50.24 | 75.36 | 100.48 |
| 进给量 $f/(mm/rev)$   | 0.1   | 0.2   | 0.3    |
| 切削深度 $a_p/mm$      | 1.0   | 1.5   | 2.0    |

表 5 正交实验结果

| 实验序号 | 切削速度 $v_c/(m/min)$ | 进给量 $f/(mm/rev)$ | 切削深度 $a_p/mm$ | 刀具磨损深度 $VB/\mu m$ |
|------|--------------------|------------------|---------------|-------------------|
| 1    | 1                  | 1                | 1             | 0.214             |
| 2    | 1                  | 2                | 2             | 0.651             |
| 3    | 1                  | 3                | 3             | 1.620             |
| 4    | 2                  | 1                | 2             | 0.543             |
| 5    | 2                  | 2                | 3             | 1.340             |
| 6    | 2                  | 3                | 1             | 1.530             |
| 7    | 3                  | 1                | 3             | 1.090             |
| 8    | 3                  | 2                | 1             | 1.160             |
| 9    | 3                  | 3                | 2             | 1.870             |

3.2 方差分析

通过方差分析不同切削参数对刀具磨损的显著性,确定各参数对刀具磨损的影响。利用 SPSS 软件得到方差分析结果如表 6 所示。由表 6 可知,切削速度和进给量的  $P$  值均小于 0.01,因此两者对刀具磨损影响极其显著,而切削深度的  $P$  值小于 0.05,因此切削深度对刀具磨损的影响显著。

表 6 正交实验方差结果

| 因素                 | 偏差平方和 | 自由度 | 方均    | $F$ 值   | $P$   |
|--------------------|-------|-----|-------|---------|-------|
| 切削速度 $v_c/(m/min)$ | 0.448 | 2   | 0.224 | 111.094 | 0.009 |
| 进给量 $f/(mm/rev)$   | 1.696 | 2   | 0.848 | 420.265 | 0.002 |
| 切削深度 $a_p/mm$      | 0.257 | 2   | 0.128 | 63.642  | 0.015 |
| 误差                 | 0.004 | 2   | 0.002 | —       | —     |

### 3.3 极差分析

通过极差分析可以得出各切削参数对刀具磨损影响趋势和程度,表7为极差分析结果。从表7中可知切削进给量对刀具磨损影响最大,其次是切削速度,切削深度的影响最小。若以刀具磨损深度最小为目标的最优组合为  $v_c = 50.24 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.1 \text{ mm/rev}$ ,  $a_p = 1 \text{ mm}$ 。由于切削深度的实验指标之和相差最小,因此在保证工艺精度为前提下,可通过适当的增大切削深度以达到高效生产。因此按主次顺序排列为  $f > v_c > a_p$ 。

表7 极差分析结果

| 组号    | 切削速度<br>$v_c / (\text{m/min})$ | 进给量<br>$f / (\text{mm/rev})$ | 切削深度<br>$a_p / \text{mm}$ |
|-------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| $k_1$ | 0.828                          | 0.616                        | 0.968                     |
| $k_2$ | 1.138                          | 1.050                        | 1.021                     |
| $k_3$ | 1.373                          | 1.673                        | 1.350                     |
| $R$   | 0.545                          | 1.058                        | 0.382                     |

## 4 结语

1) 通过单因素实验得到了切削参数对刀具磨损深度的影响规律,切削参数的增大均导致刀具磨损深度的增大。

2) 对有限元模拟仿真后刀具磨损形貌进行了分析,刀具磨损主要发生在前刀面及切削刃处。在刀具前刀面靠近切削刃处产生月牙洼,宽度较窄且边界呈锯齿形。

3) 通过对正交实验进行方差分析和极差分析得出切削进给量对刀具磨损影响最大,其次是切削速度,切削深度的影响最小。在满足工艺精度要求的前提下,可适当提高切削深度来提升生产效率。

### 参考文献:

- [1] 卢跃峰,汪振华,马耀,等. 超声铣削钛铝合金表面完整性与刀具磨损研究[J]. 机械设计与制造, 2023(4):118-123,129.
- [2] 袁芳,徐亮,王新永,等. 高速铣削 Ti-10V-2Fe-3Al 的刀具磨损试验研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(1):51-55.
- [3] 于风云,王菁,熊涛,等. 铣削高温合金 GH3039 刀具寿命预测及磨损机理[J]. 黑龙江科技大学学报, 2024, 34(1):53-60.
- [4] 吕娜. 基于 ABAQUS 有限元仿真的硬质合金刀具磨损机制研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(4):164-168.

- [5] 焦丹丹,裴禹,赵孟石,等. SCD 刀具高速切削 SiCp/Al 刀具磨损仿真分析[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(6):177-179,183.
- [6] 于晓琳,吕诚凯,黄树涛,等. 铣削高强度钢刀具磨损有限元仿真研究[J]. 工具技术, 2022, 56(1):9-14.
- [7] OKOKPUJIE I P, CHIMA P C, TARTIBU L K. Experimental and 3D-deform finite element analysis on tool wear during turning of Al-Si-Mg alloy[J]. Lubricants, 2022, 10(12):341.
- [8] CAPPELLINI C, CONCLI F. FEM modelling of tool wear in hard turning operations[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1190(1):012023.
- [9] 刘海洋. 铁型覆砂灰铸铁件氮气孔缺陷分析与改善措施[J]. 铸造工程, 2024, 48(1):54-57.
- [10] CHEN Y L, XUE Z L, SONG S Q, et al. Evolution of microstructure and high temperature tensile strength of gray cast iron HT250: the role of molybdenum[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 863:144511.
- [11] 李双,吕海宁,黄小华,等. 船用灰铸铁材料裂纹扩展的近场动力学研究[J]. 船舶力学, 2023, 27(9):1379-1389.
- [12] 陆剑中,孙家宁. 金属切削原理与刀具[M]. 5版. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [13] WANG B, CUI N, ZHANG Y. Finite element analyzing the influence of cutting Ht250 by self-prepared Si3n4 insert with different cutting depth[J]. Chemical Engineering Transactions (CET Journal), 2017, 59.
- [14] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the 7th Int. Symposium on Ballistics. The Hague, 1983: 541-547.
- [15] 王玉龙. 灰铸铁 HT250 铣削加工实验与仿真研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2016.
- [16] 杨振阳,龚文邦,凌远征,等. 基于 DEFORM 对 Inconel 718 合金车削加工的刀具磨损仿真研究[J]. 武汉纺织大学学报, 2023, 36(5):58-60.
- [17] 张阳. 氮化硅刀具车削灰铸铁的有限元仿真分析及实验验证[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- [18] ZOREV N N. Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting[C]//Proceedings of the International Production Engineering Research Conference. Pittsburgh, 1963: 42-49.

收稿日期:2024-04-09