

# 基于多目标优化的硬质合金刀具前刀面粘结破损试验研究

李健男<sup>1</sup>, 郑敏利<sup>1</sup>, 陈金国<sup>1,2</sup>, 张为<sup>1</sup>, 陈保良<sup>1</sup>, 张跃<sup>1</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨理工大学高效切削及刀具国家地方联合工程重点实验室;

<sup>2</sup>莆田学院福建省激光精密加工工程技术研究中心

**摘要:** 为了提高硬质合金刀具在切削加工 2.25Cr1Mo0.25V 材料时的使用寿命,有效减少切削过程中刀具的粘结破损,提出了以粘结破损深度、面积最小为优化目标,以切削速度、进给量、切削深度为优化变量的多目标优化设计方法。设计单因素试验,对不同切削参数下的刀具粘结破损形貌进行分析。在单因素的试验基础上建立三因素四水平正交试验,运用熵值法将多个试验结果进行综合处理。建立刀具粘结破损量的二阶响应面模型,得到切削参数与刀具粘结破损之间的变化规律,并通过对切削参数的范围划分,明确硬质合金刀具的切削参数优选区域。

**关键词:** 硬质合金刀具;2.25Cr1Mo0.25V;多目标优化;粘结破损

中图分类号: TG711;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.01.003

## Research on Bond Breakage of Rake Face of Carbide Tools Based on Multi-Objective Optimization

Li Jiannan, Zheng Minli, Chen Jinguo, Zhang Wei, Chen Baoliang, Zhang Yue

**Abstract:** In order to improve the cemented carbide tool life when cutting 2.25Cr1Mo0.25V material, and effectively reduce the bond breakage of the tool during the cutting process, a multi-objective optimization design method with the sticking failure depth and the minimum area as the optimization target and the cutting speed, feed rate and cutting depth amount as the optimization variables is proposed. Based on the single factor experiment, a three-factor four-level orthogonal experiment is established, and multiple experimental results are processed comprehensively by entropy method. The second-order response surface model of tool sticking failure is established, and the variation law between cutting parameters and tool sticking failure is obtained. By dividing the range of cutting parameters, the optimum region of the cutting parameters for the cemented carbide tool is defined.

**Keywords:** cemented carbide tool; 2.25Cr1Mo0.25V; multi-objective optimization; bond breakage

## 1 引言

由于 2.25Cr1Mo0.25V 钢具有高耐热性、高强度、热韧性好等优点而广泛应用于制造核反应堆容器和石化领域的大型加氢反应器<sup>[1]</sup>。这些反应器的内壁需要承受极高的压力,要求容器具有很好的密闭性。而 2.25Cr1Mo0.25V 毛坯件是直接锻造而成,锻造过程中表面会出现大裂纹、氧化皮、夹渣、夹砂及余量不均等缺陷,致使刀具在加工过程中承受热波动和机械耦合冲击载荷,导致刀具粘结破损严重、生产效率降低<sup>[2]</sup>。

目前,国内外对切削难加工材料的刀具粘结破损研究多与切削参数相关。例如, Sun F. 等<sup>[3]</sup>通过试验研究发现铣削速度和铣削时间是影响刀具粘附

磨损的主要因素; Sölter J. 等<sup>[4]</sup>建立了热通量分布回归模型,得出刀具的粘结破损绝大多数发生在高温高压环境下,而且热通量不仅取决于热量值,也取决于切削速度和切削深度; Balaji M. 等<sup>[5]</sup>基于响应曲面法对 WC 麻花钻刀具切削 Ti-6Al-4V 材料时的磨损特性进行研究,证实了选用合理的切削参数可以有效减少钻头的侧面磨损; 王志刚等<sup>[6]</sup>通过试验研究证明切削速度越低,进给量越大,刀具的粘结破损越严重; 何耿焯等<sup>[7]</sup>对专有工件进行切削试验,分析了不同区域刀片最佳切削性能以及使用寿命,揭示了不同切削参数组合条件下的刀具破损机理; 程耀楠等<sup>[8]</sup>以筒节材料 2.25Cr1Mo0.25V 钢切削试验为基础,研究极端重型切削过程中刀-屑粘结失效问题,并从技术手段和工艺参数优化方面,提出了刀具与切屑之间粘结的预防措施,给出了切削加工参数量化范围; 冯鸣<sup>[9]</sup>通过大量断续切削试验,研究不同槽型结构对硬质合金刀具破损的影响,提出采用倒棱的强化切削刃可以有效减小刀具破损; 郑

基金项目: 国家自然科学基金(51575146); CAD/CAM 福建省高校工程研究中心 2017 年度开放基金项目(K201709); 福建省中青年教育教研项目(JAT170506)

收稿日期: 2018 年 8 月

有想<sup>[10]</sup>采用正交试验对锻造成形工艺参数进行多目标优化,利用综合平衡法优选出兼顾两个目标质量的工艺参数组合;卫炜等<sup>[11]</sup>运用模糊数学综合评判方法,对注塑成型的三个目标进行综合评判,通过对综合评判结果的极差分析得出最优的注塑工艺参数组合方案。

为进一步研究切削加工 2.25Cr1Mo0.25V 材料时刀具粘结破损与切削参数之间的关系,提高刀具使用寿命,本文通过设计正交试验研究切削参数对刀具粘结破损的影响,构建刀具粘结破损的回归模型,为预测刀具前刀面粘结破损提供理论基础,并分析刀具粘结破损与切削参数之间的变化规律,优化出合理的切削加工参数范围。

## 2 试验内容

### 2.1 试验材料

试验工件材料为 2.25Cr1Mo0.25V 钢,切削刀具选用硬质合金刀具。硬质合金刀具由于其具有硬度高、耐热性强、化学稳定性好等优点广泛应用于切削加工中。由于 2.25Cr1Mo0.25V 钢中含有 Fe、Cr、Ni 等元素,与硬质合金刀具中的 Co 元素为同族元素,这些元素之间在高温高压下具有很强的亲性和,使得硬质合金刀具在切削过程中易发生粘结破损。在硬质合金刀具中,YT15 刀具拥有较好的耐磨性和一定的抗冲击韧性,在实际加工中应用广泛,所以试验选用刀片型号为 YT15。

### 2.2 试验设备及方法

在 C6140 机床上进行切削试验,切削试验系统见图 1。为了模拟在实际加工过程中由于工件表面质量差导致的刀具断续切削,对 2.25Cr1Mo0.25V 材料的开槽圆柱形工件进行车削。在保证冲击次数相同的条件下,通过改变机床转速、进给量和切削深度,观察力和热的变化来确定是否发生粘结破损,并获得不同切削参数下不同粘结破损程度的刀具。将所获得的刀具通过超声波清洗机清洗处理后,利用超景深显微镜观察刀具粘结破损形貌,并测量刀片的粘结破损面积和粘结破损深度(见图 2)。

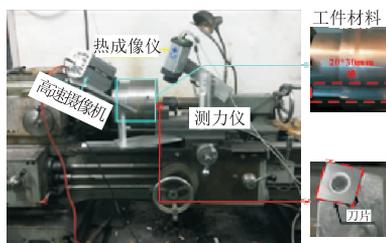


图 1 切削试验系统



图 2 刀具粘结破损参数测量

## 3 试验结果及分析

为了研究切削速度、进给量、切削深度对刀具粘结破损的影响规律,设计了单因素试验。通过对切削 2.25Cr1Mo0.25V 钢的试验研究发现,当切削速度达到 60m/min、进给量 0.1mm/r、切削深度 0.5mm 时,刀具的粘结破损有明显变化。考虑到较大的切削参数会增加刀具的冲击载荷,导致机床颤振,使得切削试验误差增大,所以制定单因素试验方案为:①进给量  $f = 0.25\text{mm/r}$ 、切削深度  $a_p = 2\text{mm}$  保持不变,切削速度  $v$  分别取 60、70、80、90m/min;②切削速度  $v = 60\text{m/min}$ 、切削深度  $a_p = 1.5\text{mm}$  保持不变,进给量  $f$  分别取 0.1、0.15、0.2、0.25mm/r;③切削速度  $v = 70\text{m/min}$ 、进给量  $f = 0.15\text{mm/r}$  保持不变,切削深度  $a_p$  分别取 0.5、1、1.5、2mm。对上述 12 组试验进行观察得到了不同切削参数下刀具前刀面粘结破损形貌,结果见图 3 - 图 5。

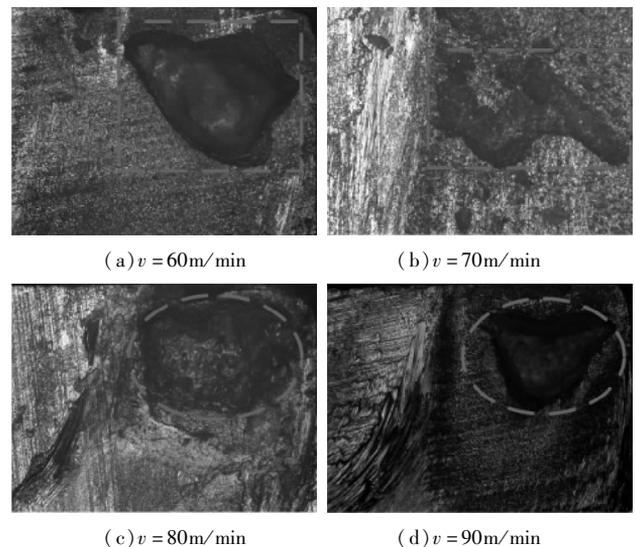


图 3 不同切削速度下刀具前刀面粘结破损形貌

综合不同切削参数下刀具前刀面的粘结破损形貌图可以看出,切削参数对刀具粘结破损有显著影响,刀具前刀面出现凹坑和破损,粘结破损比较明显。并且在较大的切削速度、较小的进给量、较小的

切削深度时刀具粘结破损程度较小。测量 12 组试验刀具的粘结破损与刀尖之间的距离  $d$  的结果如图 6 所示。由图可见, 粘结破损与刀尖的距离一般在 416-716 $\mu\text{m}$  区间内, 距离有一定的波动幅度, 但并不大, 说明刀具的粘结破损一般发生在刀具前刀面靠近刀尖位置处。

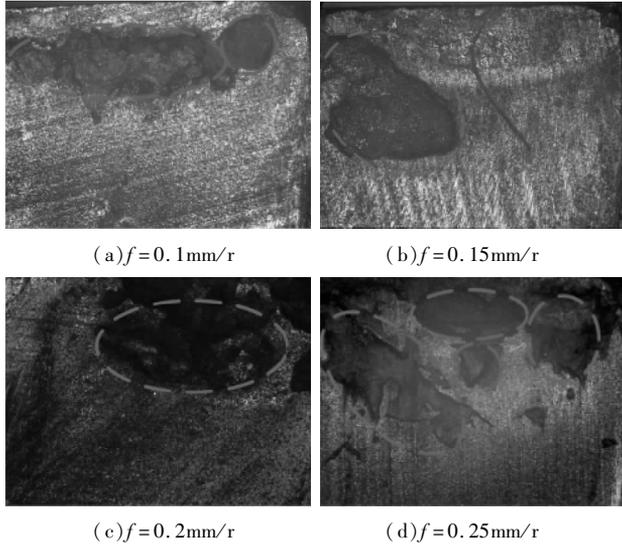


图 4 不同进给量下刀具前刀面粘结破损形貌

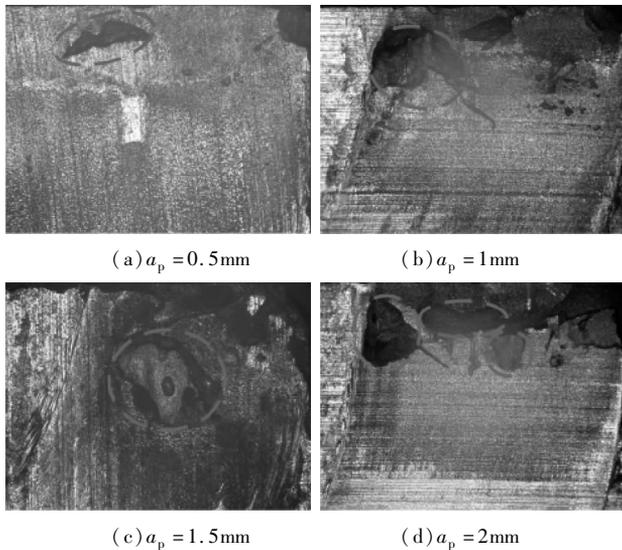


图 5 不同切削深度下刀具前刀面粘结破损形貌

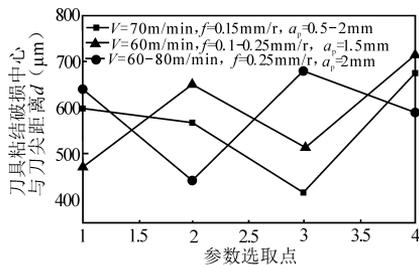


图 6 刀具粘结破损与刀尖距离

为了更好地分析不同切削速度、进给量和切削深度对刀具粘结破损的影响, 设计了三因素四水平

正交试验, 试验具体方案如表 1 所示。通过测量得出 16 次试验的粘结破损深度  $H$  和粘结破损面积  $S$ , 结果列于表 2。

表 1 正交试验方案

因素	切削速度 $v$ (m/min)	进给量 $f$ (mm/r)	切削深度 $a_p$ (mm)
1	60	0.1	0.5
2	70	0.15	1
3	80	0.2	1.5
4	90	0.25	2

表 2 正交试验结果

编号	$v$	$f$	$a_p$	粘结深度 $H$ ( $\mu\text{m}$ )	粘结面积 $S$ ( $\mu\text{m}^2$ )
1	60	0.1	0.5	51.47	598428
2	60	0.15	1	48.85	1086317
3	60	0.2	1.5	81.09	1375909
4	60	0.25	2	48.50	2086134
5	70	0.1	1	102.22	160243
6	70	0.15	0.5	96.20	412355
7	70	0.2	2	24.67	1975363
8	70	0.25	1.5	201.70	279458
9	80	0.1	1.5	20.39	970082
10	80	0.15	2	68.54	19727
11	80	0.2	0.5	51.31	904769
12	80	0.25	1	55.98	1026683
13	90	0.1	2	8.27	222800
14	90	0.15	1.5	40.30	62767
15	90	0.2	1	35.40	396433
16	90	0.25	0.5	65.84	415300

### 4 确定合理切削参数

本文利用熵值法确定各项指标在整个试验中所占的权重值, 将多指标试验结果化为单指标试验结果, 并构建二阶响应模型, 得到刀具粘结破损与切削参数之间的函数关系, 分析函数关系得出适宜的切削加工参数范围。

#### 4.1 统一量纲

设多指标试验问题有  $n$  个试验方案, 有  $m$  个试验指标, 试验方案  $i$  对试验指标  $j$  的试验值为  $x_{ij}$ 。称矩阵  $X = (x_{ij})_{n \times m}$  为方案对指标的评价矩阵。在本次研究中, 设计了 16 组试验方案, 粘结破损深度、粘结破损面积 2 个指标, 即  $X = (x_{ij})_{16 \times 2}$ 。根据正交试验结果得到评价矩阵  $X$ , 由于评价指标间的量纲不一致, 需要对评价矩阵  $X$  进行标准化处理。本次研究要求粘结破损深度、粘结破损面积越小越好。按综合加权评分值越小越好的评判准则将  $X$  标准化, 得到最终的评价矩阵  $Z$  为

$$X = \begin{bmatrix} 51.47 & 598428 \\ 48.85 & 1086317 \\ 81.09 & 1375909 \\ 48.50 & 2086134 \\ 102.22 & 160243 \\ 96.20 & 412355 \\ 24.67 & 1975363 \\ 201.70 & 279458 \\ 20.39 & 970082 \\ 68.54 & 19727 \\ 51.31 & 904769 \\ 55.98 & 1026683 \\ 8.27 & 222800 \\ 40.30 & 62767 \\ 35.40 & 396433 \\ 65.84 & 415300 \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} 22.33 & 28.01 \\ 20.98 & 51.62 \\ 37.56 & 65.63 \\ 20.80 & 100 \\ 48.57 & 6.81 \\ 45.56 & 19.00 \\ 8.48 & 94.64 \\ 100 & 12.57 \\ 6.27 & 45.99 \\ 31.16 & 0 \\ 22.25 & 42.83 \\ 24.67 & 48.73 \\ 0 & 9.83 \\ 16.56 & 2.08 \\ 14.03 & 18.23 \\ 29.76 & 19.14 \end{bmatrix}$$

### 4.2 确定各指标权重

熵值法是根据各指标的变异程度,通过计算熵值判断某个指标对综合评价的影响大小。利用熵值法确定指标权重,既可以克服主观赋权法无法避免的随机性、臆断性问题,还可以有效解决多指标变量间信息的重叠问题<sup>[12]</sup>。

根据熵值法计算公式

$$h_j = -(\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$$

式中,  $p_{ij} = z_{ij} / \sum_{i=1}^n z_{ij}$ 。

当  $p_{ij} = 0$  时,规定  $p_{ij} \ln p_{ij} = 0 (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ ,  $\omega_j = (1 - h_j) / \sum_{k=1}^m (1 - h_k) (j = 1, 2, \dots, m)$ , 确定各项指标权重  $\omega = [0.435 \ 0.565]^T$ 。

### 4.3 计算粘结破损综合评价

由综合加权评分公式  $N_i = \sum_{j=1}^m z_{ij} \omega_j (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$  计算出各项试验指标的综合评价值为  $N = [25.54, 38.29, 53.42, 65.55, 24.98, 30.63, 57.16, 50.60, 28.71, 13.55, 33.88, 38.26, 5.55, 8.38, 16.40, 23.76]$ 。

### 4.4 响应面建模

响应面建模是通过将统计方法与数学建模相结合,从而建立分析目标与设计变量之间函数关系的一种建模方法。响应面模型一般为高阶多项式,是一种广泛应用的回归模型。由于二阶响应模型的预测精度高、预测性能好,所以在机械工程领域中应用最为广泛,其函数模型为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

式中,  $y$  为因变量;  $x$  为自变量;  $\beta_0$  为常数;  $\beta_{ij} (i, j = 1, 2, 3, \dots, k)$  为回归参数;  $\varepsilon$  为随机误差。

采用式(1),应用最小二乘法对粘结破损综合评价值进行回归分析,得到关于粘接破损的目标响应函数为

$$N = -173.628 + 4.48256v + 361.37045f + 65.27636a_p - 0.02555v^2 + 281f^2 - 0.855a_p^2 - 4.48954vf - 0.788954va_p - 15.136fa_p \quad (2)$$

为了验证二阶响应模型是否能够反映刀具粘结破损与切削参数之间的统计规律,对式(2)的模型进行方差分析,分析结果见表3,其中当  $P$  值小于  $0.05 (\alpha = 0.05)$  时,则表示该指标高度显著。通过方差分析可以得出模型的  $P$  值远小于显著性水平  $\alpha$ ,说明得到的二阶回归方程非常显著。

表3 回归分析结果

来源	自由度	平方和	均方差	F 检验	P 值
模型	9	4343.66	482.63	9.21	0.002
误差	6	314.473	52.412		
合计	15	4658.13			

### 4.5 切削参数与粘结破损关系分析

通过预测模型得出的刀具粘结破损量随切削参数变化规律,如图7-图9所示。图7为切削速度  $v$  与刀具粘结破损之间的函数关系图。通过图7可以得出,随着切削速度的增加,刀具粘结破损呈现出减小的趋势。这是由于当切削速度增加时,切削温度逐渐升高,从而引起刀片材料软化,刀片的抗断裂韧性提高,并且在较高的切削速度下,切屑与刀具前刀面的接触时间变短,使得切屑与前刀面难以形成牢固的结合,从而降低刀具的粘结破损。

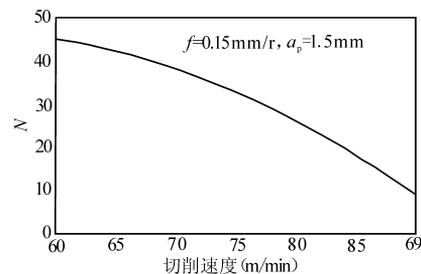


图7 切削速度与粘结破损的关系

图8为进给量  $f$  与刀具粘结破损之间的函数关系。通过图8可以得出,刀具粘结破损随进给量的增加而增加。当进给量增加时,工件每转一圈的切削量增加,使得切屑增多,刀具粘结破损变得更严重。进给量相对于切削深度对刀具粘结破损的影响程度更高,这是由于进给量的增加使得单位长度切削刃的切削工作量增加,而切削深度的增加使得刀具在切削过程的切削刃长度增加,相比之下进给量

增加的工作量要比切削深度多,并且进给量增加带来的持续磨损会导致刀具的粘结破损越来越严重。

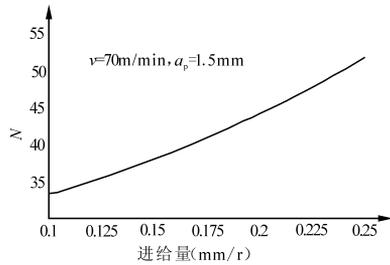


图8 进给量与粘结破损的关系

图9为切削深度 $a_p$ 与刀具粘结破损之间的函数关系。从图9曲线的整体变化来看,随着切削深度的增加,刀具的粘结破损表现为逐渐增加的趋势。这是由于当切削深度增加时,在受冲击和切削层中硬质点的作用下,工件对刀具的冲击载荷增加,切屑与前刀面的接触面积增加,导致刀具粘结破损增加。

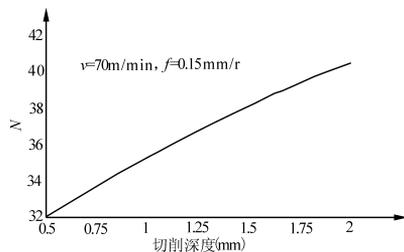


图9 切削深度与粘结破损的关系

综合图7-图9可以看出:切削速度对粘结破损的影响最大,其次是进给量;切削深度对粘结破损也有影响,但影响程度不大。在加工允许范围内可以选择较高的切削速度和较小的进给量。由于切削深度对刀具的粘结破损影响并不大,因此可以适当增加切深从而提高加工效率。

## 5 结语

针对切削2.25Cr1Mo0.25V钢材料时刀具的粘结破损问题进行了研究,分析了刀具粘结破损形貌,并根据影响刀具粘结破损的主要因素,得出了切削速度、进给量以及切削深度对刀具粘结破损的影响规律,并得到了适宜的切削参数范围。

(1)通过切削试验得出,在切削表面质量不好的2.25Cr1Mo0.25V钢材料时刀具粘结破损现象普遍发生,刀具的粘结破损一般发生在前刀面靠近刀尖位置处,刀具失效快,粘结破损严重。

(2)随着切削速度的增加,刀具粘结破损程度减少;随着进给量和切削深度的增加,刀具粘结破损程度增加。切削速度越低,进给量越大,刀具粘结破损越严重。

(3)通过分析试验数据得出各因素对刀具粘结破损的影响顺序为:切削速度>进给量>切削深度。在实际加工中可以选用较大的切削速度、较小的进给量和适当的切削深度来减少刀具的粘结破损。

## 参考文献

- [1] 吕祥. 2.25Cr1Mo0.25V筒节材料断续车削及刀具失效机理研究[D]. 济南:山东大学,2011.
  - [2] 张景利,何耿煌,李文涛,等. 大型锻造件筒节切削加工性及提高切削效率措施[J]. 机械工程师,2010(5):139-141.
  - [3] Sun F, Li Z, Jiang D, et al. Adhering wear mechanism of cemented carbide cutter in the intervallic cutting of stainless steel[J]. Wear, 1998, 214:79-82.
  - [4] Sölter J, Gulpak M. Heat partitioning in dry milling of steel[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61:87-90.
  - [5] Balaj M, V Rao K, M N Rao, et al. Optimization of drilling parameters for drilling of Ti-6Al-4V based on surface roughness, flank wear and drill vibration[J]. Accepted Manuscript, 2017:114.
  - [6] 王志刚,刘琳,王玉斌,等. 三维复杂槽型铣刀片切削温度与粘接破损研究[J]. 机械工程师,2010(4):29-31.
  - [7] 何耿煌,吴冲浒,刘献礼,等. 断续切削过程硬质合金可转位刀片破损行为研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2015, 35(3):10-16.
  - [8] 程耀楠,刘献礼,李振加,等. 极端重载切削条件下的刀-屑粘附失效[J]. 机械工程学报,2012, 48(19):169-175.
  - [9] 冯鸣. 硬质合金可转位刀片断屑槽设计及破损机理研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
  - [10] 郑有想. 基于正交试验的铝合金筋板类锻件成形工艺参数多目标优化[J]. 热加工工艺,2015, 44(9):168-172.
  - [11] 卫炜,胡泽豪. 正交试验设计的注塑成型工艺参数多目标优化设计[J]. 现代制造工程,2009(2):94-97.
  - [12] 王富喜,毛爱华,李赫龙,等. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析[J]. 地理科学,2013, 33(11):1323-1328.
- 第一作者:李健男,硕士研究生,哈尔滨理工大学机械动力工程学院,150080 哈尔滨市
- First Author: Li Jiannan, Postgraduate, School of Mechanical Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China
- 通信作者:郑敏利,博士,教授,哈尔滨理工大学“高效切削及刀具”国家地方联合工程重点实验室,150080 哈尔滨市
- Corresponding Author: Zheng Minli, Doctor, Professor, State Key Laboratory of High Efficiency Cutting and Cutting Tools, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China