

# CNMG 车刀槽型的优化

李凌祥<sup>1</sup>, 姜恩来<sup>1</sup>, 万泉<sup>2</sup>, 何耿煌<sup>1</sup>, 臧文海<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 厦门金鹭特种合金有限公司; <sup>2</sup> 哈尔滨理工大学

**摘要:** 针对金属材料在切削加工时断屑不及时而影响加工效率、破坏工件已加工表面完整性、降低刀具的使用寿命等问题, 基于槽型刀具备改善刀具切削性能的优势, 以优化车刀三维复杂槽型为目的, 分析断屑机理及槽型设计准则, 基于数学模型对槽型进行优化设计, 并以切削力及切削温度作为评价指标进行三维复杂槽型车刀切削高温合金的有限元切削仿真分析。仿真优化槽型后的车刀车削力及车削温度均小于未优化的槽型车刀, 表明槽型优化有效改善了车刀的切削性能, 证明槽型优化的可靠性及准确性。优化槽型后的切削参数优选为:  $v_c = 25 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0.2 \text{ mm/r}$ ,  $a_p = 1.6 \text{ mm}$ 。

**关键词:** CNMG 车刀; 槽型优化; GH4169 高温合金; 断屑机理

**中图分类号:** TG132.3 + 2; TG712 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.11.011

## Slot Optimization of CNMG Turning Tool

Li Lingxiang, Jiang Enlai, Wan Quan, He Genghuang, Zhang Wenhai

**Abstract:** In view of the problems that chip breaking does not occur in time during the metal cutting, which affects the efficiency of automatic processing, destroys the surface integrity of the workpiece and reduces the service life of the tool. Based on the advantages of slot cutter in improving the cutting performance of the tool, this paper aims at optimizing the three-dimensional complex slot of turning tool, analyzing the chip breaking mechanism and slot design criteria, establishing a mathematical model, and designing the slot of the turning tool. Cutting force and cutting temperature are used as evaluation indexes to carry out finite element simulation analysis of cutting superalloy with 3D complex groove turning tool. The simulation results show that the milling force and temperature of optimized groove turning tool are less than those of non-optimized groove turning tool. It shows that groove optimization effectively improves the cutting performance of turning tool and proves the reliability and accuracy of groove optimization. The cutting parameters of optimized groove are optimized as follows:  $v_c = 25 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0.2 \text{ mm/r}$ ,  $a_p = 1.6 \text{ mm}$ .

**Keywords:** CNMG turning tool; groove optimization; GH4169 superalloy; chip breaking mechanism

## 1 引言

为满足航空航天的发展需求, 高温合金等难加工材料在航空零部件中的应用比重逐步增加, 零部件的加工精度要求也越来越高。因此, 不断提高刀具的切削性能来提高零件的质量日益迫切<sup>[1,2]</sup>。金属材料的切削加工过程会产生大量切屑, 如切屑不能及时折断, 缠绕在工件或刀具上, 将极大影响加工效率, 破坏工件已加工表面完整性, 降低刀具使用寿命。因此, 研究切屑的卷曲形式, 有效控制切屑的折断, 从而改善刀具的切削性能成为了提高零件表面质量的关键。目前, 三维复杂沟槽刀片的应用越来越多, 通过断屑类型的设计控制断屑已成为一个热门的研究课题。

对于精密切削加工, K. Nakayama 等<sup>[3,4]</sup>发现通过改变断屑槽的形状及结构, 可对切屑加压弯矩作

用使切屑卷曲; 哈尔滨理工大学李振加教授<sup>[5,6]</sup>分析了断屑槽型作用, 设计了不同切削条件下的波形刃断屑槽, 分析其在断屑过程中的作用, 设计开发了槽型 CAD 专家系统; 杨治国等<sup>[7]</sup>研究了断屑槽的断屑机理及其控制切屑形成的方法, 结果表明, 切屑折断与切削深度与卷曲半径的比值有关, 随着比值的增大, 切屑折断的容易程度增加。综上可知, 槽型对断屑起到了积极的作用, 可有效改善刀具的切屑性能及工件表面质量。

本文以优化车刀三维复杂槽型为目的, 分析断屑机理及槽型设计准则, 建立数学模型, 对槽型进行优化设计, 并将切削力及切削温度作为评价指标对三维复杂槽型车刀进行高温合金的有限元切削仿真分析, 验证优化后槽型的可靠性, 为提高槽型刀的切削性能提供参考。

## 2 槽型车刀断屑机理及设计

不同的几何型式构成了三维复杂槽型, 由试验

可知,断屑槽型的几何形状应根据不同的加工工况设计。当采用较大切深参数时,切屑的宽度和厚度相对较大,此时将有至少两处几何单元区域拥有断屑功能。不同断屑单元可任意组合并获得不同断屑作用的槽型。因此,综合考虑不同组合槽型的断屑性能,针对 CNMG 车刀采取槽型优化方案。

(1)斜槽槽型断屑机理

当车刀的槽型为斜槽时,采用剖视图表示其切削金属时切屑的流出方向,如图 1 所示。 $l$  为刀具槽型直线长度,当  $l_f < l$  时,由于 A 点的作用,切屑为上向卷曲型切屑,其半径  $R_c$  为

$$R_c = \frac{W_{nc}^2 + h^2 + l_f^2 + 2l_f(h\sin\gamma_o - W_{nc}\cos\gamma_o)}{2(W_{nc}\sin\gamma_o + h\cos\gamma_o)} \quad (1)$$

式中, $l_f$  为刀一屑接触长度(mm); $h$  为后背升高量(mm); $\gamma_o$  为法向前角( $^\circ$ )。

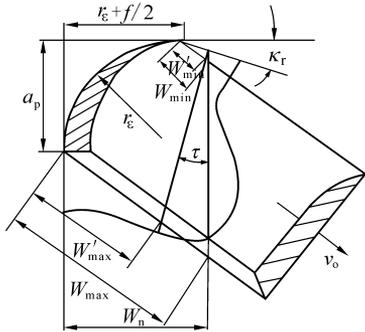


图 1 斜槽作用机理

当  $l_f > l$  时,由于圆弧部分的影响,切屑开始卷曲。在斜槽槽型中,受倾斜斜角  $t$  影响的实际作用,槽宽  $W'_{max}$  和  $W'_{min}$  为

$$W'_{max} = W_{max} - \left\{ a_p + W \tan\psi_\lambda - [W - (r_\epsilon + f/2)] \tan\kappa \right\} \frac{\sin\tau}{\cos(\psi_\lambda - \tau)} \quad (2)$$

$$W'_{min} = W_{min} - \left\{ [W - (r_\epsilon + f/2)] (\tan\psi_\lambda - \tan\kappa_r) \right\} \frac{\sin\tau}{\cos(\psi_\lambda - \tau)} \quad (3)$$

斜槽槽型中倾斜角  $t$  会导致实际作用槽宽缩短,使切屑断屑效果更好。等效槽宽可近似为

$$W_n = \frac{W'_{max} + W'_{min}}{2} \quad (4)$$

由式(4)可求出极限进给量的表达式为<sup>[8]</sup>

$$f_{cr} = \frac{\epsilon_B C_h K_R}{2\alpha \sin\kappa_r \sin\gamma_n} (1 - 2\beta' \cos\gamma_n) \cdot \frac{W'_{max} + W'_{min}}{2} \quad (5)$$

$$f_{cr} = \frac{\epsilon_B C_h K_R}{2\alpha \sin\kappa_r} \left[ \frac{\tan\theta}{\cos\gamma_n (\tan\gamma_n + \tan\theta)} - \beta' \right] \cot \frac{\gamma_n + \theta}{2} \cdot \frac{W'_{max} + W'_{min}}{2} \quad (6)$$

(2)凸曲面槽型断屑机理

凸曲面槽型的实际作用槽型宽度如图 2 所示,

其中, $OO_1 = a, r$  为凸曲面的圆弧半径。

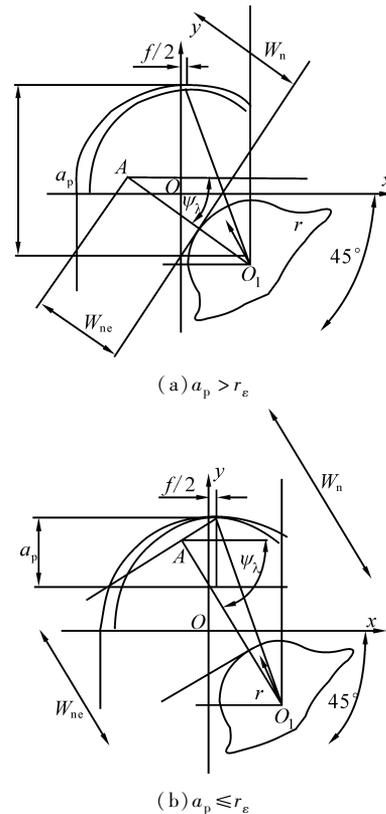


图 2 凸曲面作用机理

当  $a_p \leq r_\epsilon$  时,实际作用槽宽  $W_1$  可表示为

$$W_1 = \sin\psi_{\lambda 1} [y_1 - y_{01} + \cot\psi_{\lambda 1} (x_1 - x_{01})] - r \quad (7)$$

式中, $\psi_{\lambda 1} = \arctan \left[ \frac{\sqrt{2r_\epsilon a_p - a_p^2} + f/2}{a_p} \right]$ ;  $y_2 = -a_p + r_\epsilon$ ;  $x_1 = \sqrt{2r_\epsilon a_p - a_p^2}$ ;  $y_{01} = x_{01} = -\frac{a}{\sqrt{2}}$ 。

当  $a_p > r_\epsilon$  时,实际作用槽宽  $W_2$  可表示为

$$W_2 = \sin\psi_{\lambda 2} [y_2 - y_{01} + \cot\psi_{\lambda 2} (x_2 - x_{01})] - r \quad (8)$$

式中, $\psi_{\lambda 2} = \arctan \left[ \frac{r_\epsilon + f/2}{a_p} \right]$ ;  $y_2 = -a_p + r_\epsilon$ ;  $x_2 = r_\epsilon$ ;  $y_{01} = x_{01} = -\frac{a}{\sqrt{2}}$ 。

如图 2 所示,在刀尖位置处设计小型凸包结构会导致切屑更加容易折断。刀尖位置附近的小凸包结构会导致断屑槽宽缩短。对于较小切削深度,相对于刀尖部分无凸包的槽型,切屑更加容易从凸起部分流出,而且,刃倾角  $l_s$  还会导致切屑被小凸包阻止而发生折断的现象。当切削深度较大时, $W_{nc}$  将会减小,同时由于刀尖处的短圆弧和小前角的作用,切屑的形变较大,在极限进给量  $f_{cr}$  减小时,切屑更容易折断。所以刀尖部分的凸包结构主要起到限制切屑流向功能。

(3) 曲线刃槽型断屑机理

断屑效果受切屑卷曲半径、切屑的截面应变以及槽型的结构影响,上述参数的关系可表示为

$$\varepsilon_{\max} = \alpha h_{\text{ch}} \frac{K_R}{R_c} > \varepsilon_B \quad (9)$$

式中,  $\varepsilon_{\max}$  为切屑最大应变值;  $R_c$  为切屑的卷曲半径;  $h_{\text{ch}}$  为切屑厚度;  $\alpha h_{\text{ch}}$  为切屑中性面与粗糙面之间的长度;  $\varepsilon_B$  为切屑材料的断裂应变;  $K_R = R_L/R_c$ , 其中,  $R_L$  为切屑折断时卷曲半径。

如图 3 所示, 曲线刃槽型会导致切屑产生显著的凹凸, 说明曲线刃槽型导致切屑弯曲程度增加, 使等效切屑厚度  $h_{\text{ch}}$  及  $\alpha$  值增大。由于  $\varepsilon_{\max}$  与  $\alpha h_{\text{ch}}$  呈正比关系, 增大了切屑内部应变, 使断屑更加容易。

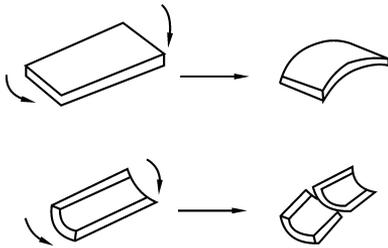


图 3 曲线刃槽型作用机理

(4) 凹曲面槽型断屑机理

凸曲面作用下的切屑折断原理如图 4 所示。由于前刀面的圆弧状凹槽和凹坑的作用, 使断屑区域变小, 切屑卷曲半径为

$$R_c = \frac{W}{2\sin\xi} - \frac{a_c}{2} \quad (10)$$

式中,  $\xi$  为入槽角。

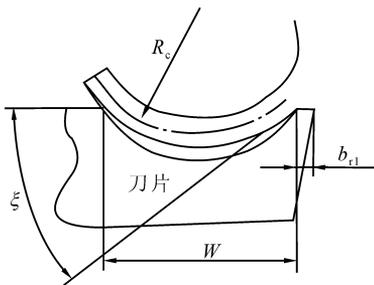


图 4 凹曲面断屑机理

若考虑  $l_f$ , 则  $R_c$  可表示为

$$R_c = \frac{W}{2\sin\xi} \left( 1 - 2 \frac{l_f}{W} \cos\xi + \frac{l_f^2}{W^2} \right) \quad (11)$$

与平行槽刀具相比, 凹曲面槽型刀参与断屑的区域面积大, 使切屑易变形, 从而导致切屑应变及剖面系数变大, 断屑更加容易。

(5) 典型组合几何单元断屑机理

凹凸曲面组合槽型截面如图 5 所示。  $l_f$  很小时,  $r$  为凸起圆弧半径, 则  $R_c$  为

$$R_c = \frac{(l_f \tan\gamma_n)^2 + (W_n + r - l_f / \cos\gamma_n)}{2[r + l_f \tan\gamma_n + (W_n + r - l_f / \cos\gamma_n) \sin\gamma_n]} \times \frac{(W_n + r - l_f / \cos\gamma_n + 2l_f \tan\gamma_n) - r^2}{2[r + l_f \tan\gamma_n + (W_n + r - l_f / \cos\gamma_n) \sin\gamma_n]} \quad (12)$$

式中,  $W_n$  为实际作用的槽宽;  $\gamma_n$  为法前角;  $r$  为凸曲面球直径;  $l_f = \beta' W_n$ 。

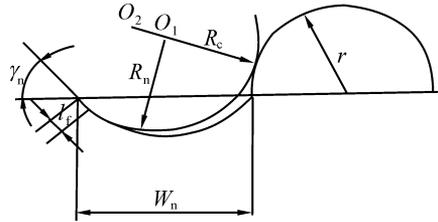


图 5 凹凸曲面作用分析

当  $R_n < R_c$  时, 切屑与凹曲面底部不发生接触; 当  $R_n > R_c$  时, 由于小凸包的阻挡, 切屑流入凹槽时会使切屑产生弯曲, 从而阻止了切屑的流出。切屑的理论卷曲折断半径数值的减小将会使切屑的折断变得更加容易。当切削深度增大到一定数值时, 会使切屑从凹曲面上流过, 由于法向槽宽  $W_{nc} < W_n$ , 导致切屑更易于折断。由于切屑卷曲半径的减小, 断屑变得更加容易; 当切削深度较大时, 切屑流过凹曲面, 由于  $W_{nc} < W_n$ , 因此切屑更加容易被折断。

综上所述, 斜槽与凸曲面断屑机理均是通过减小实际作用的槽宽使切屑折断; 而其他形式的断屑槽则采用减小切屑的上向卷曲半径或增大切屑的截面应变方式完成断屑。斜槽与凸曲面的断屑机理均为实际作用槽宽变小, 其他结构的断屑槽的作用机理为减小切屑的上向卷曲半径或增大切屑的截面应变。但实际作用槽宽过小会使切屑与前刀面的摩擦过于剧烈, 因此在设计槽型时将三种槽型结构在空间上分开布置, 以达到最优的断屑效果。

本槽型设计基于粗加工高温合金的切削深度大的工况。为保证刀具的结构强度, 减轻切屑与前刀面的摩擦, 在设计中选择槽深较浅、槽宽略宽的斜槽。为了提高槽型的断屑性能, 在刀尖附近的适当位置设计出针状凸台, 使切屑经过斜槽后受到针状凸台的阻挡进而增大卷曲半径。由于设计凹曲面会使刀具的结构强度降低, 本文不进行考虑, 最终设计出的刀具槽型见图 6a, 未优化槽型车刀模型见图 6b。

3 优化槽型车刀切削性能仿真分析

3.1 仿真边界条件和网格划分

在有限元仿真过程中, 材料的各种物理属性通过本构模型载入到仿真软件中, 材料本构模型的建

立在很大程度上影响了仿真结果的准确性。Johnson-Cook 本构模型通常高速车削条件下,有

$$\sigma = (A + B\varepsilon^{n_{塑}}) \left[ 1 + C \ln\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) \right] \left[ 1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^{m_{塑}} \right] \quad (13)$$

式中,  $\varepsilon$  为等效塑性应变率;  $\varepsilon_0$  为参考塑性应变率;  $T_{room}$  为室温;  $T_{melt}$  为材料的熔点温度;  $A, B, n_{塑}, C, m_{塑}$  描述了材料的塑性变形程度, 其中,  $A$  为室温下的原始屈服强度,  $B$  为应变强化系数,  $C$  为材料应变速率强化项系数,  $n_{塑}$  反映应变硬化效应,  $m_{塑}$  反映热软化效应。

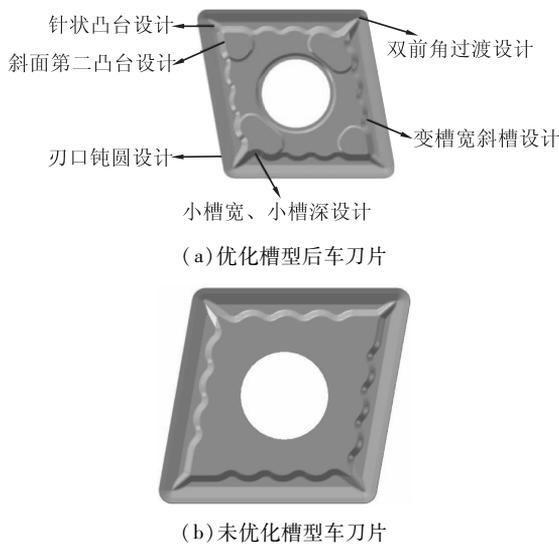


图6 优化槽型前后的刀片

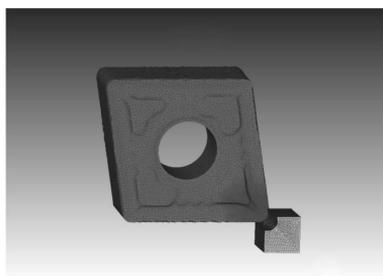


图7 自适应网格划分

表1 GH4169 的本构模型参数

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	T <sub>melt</sub> (°C)	T <sub>room</sub> (°C)
980	1370	0.02	0.164	1.03	1260	25

GH4169 的本构模型参数见表1。基于 DEFORM 仿真分析,对槽型车刀的切削性能进行分析。在有限元仿真过程中,对网格进行均匀划分,工件及刀具划分网格后如图7所示。网格划分后,需约束工件的全部自由度,设置剪切摩擦系数为0.6,单位剪切应力为45N/mm<sup>2</sup>。设置刀具的旋转运动与平移运动,按照实际制备中的转速与进给量定义刀具的旋转与移动速度,加工的初始环境温度为20℃,

定义刀具的传热表面为两个切削刃、前刀面与工件上表面。

### 3.2 仿真结果分析

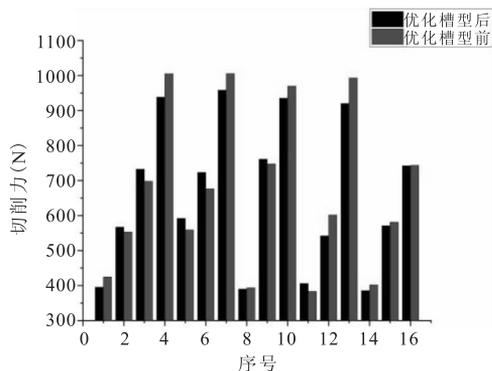
设计了三因素四水平正交试验,研究了不同切削参数下车削刀具优化前后的切削性能。由表2可知,切削参数对优化车削力的影响顺序由大到小依次为:切削深度 > 进给量 > 切削速度;切削参数对优化车削温度的影响顺序由大到小依次为:切削速度 > 进给量 > 切削深度,满足车削参数对刀具切削性能的影响顺序。由图8可知,优化槽型后的切削性能均优于优化前,其原因是在断屑槽的作用下,切屑与前刀面之间的摩擦力减小,车削力和车削温度降低,证明了槽型优化的可行性和可靠性。

表2 车削 GH4169 试验结果极差分析

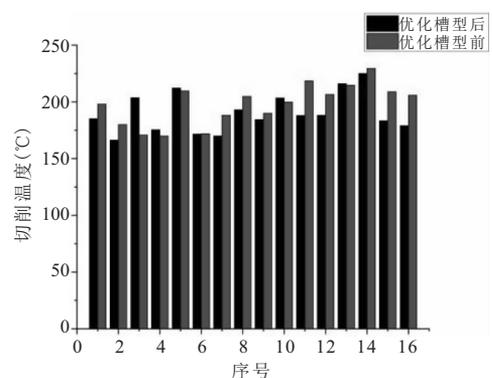
序号	切削速度 (m/min)	进给量 (mm/r)	切削深度 (mm)	优化槽型后		优化槽型前	
				车削力 (N)	车削温度 (°C)	车削力 (N)	车削温度 (°C)
1	25	0.14	0.8	395.5	185.2	424.5	198.0
2	25	0.16	1.2	567.2	166.3	553.1	180.00
3	25	0.18	1.6	732.6	203.6	698.0	170.8
4	25	0.20	2.0	938.3	175.4	1005.1	169.9
5	30	0.14	1.2	592.0	212.2	559.2	209.6
6	30	0.16	1.6	723.4	171.6	676.4	171.9
7	30	0.18	2.0	958.4	170	1005.5	188.2
8	30	0.20	0.8	390.2	193	393.7	204.8
9	35	0.14	1.6	761.1	184.4	747.5	190.0
10	35	0.16	2.0	935.3	203.4	969.9	199.8
11	35	0.18	0.8	406.0	188	383.4	218.5
12	35	0.20	1.2	542.0	188.2	601.7	206.5
13	40	0.14	2.0	920.0	216	993.2	214.7
14	40	0.16	0.8	385.5	225	402.1	229.5
15	40	0.18	1.2	571.0	183.3	581.4	208.9
16	40	0.2	1.6	742.0	179	743.4	205.8
车削力	k <sub>1</sub>	658.4	667.2	394.3	车削温度	k <sub>1</sub>	182.6
	k <sub>2</sub>	666.0	652.9	568.1		k <sub>2</sub>	186.7
	k <sub>3</sub>	661.1	667.0	739.8		k <sub>3</sub>	191.0
	k <sub>4</sub>	654.6	653.1	938.0		k <sub>4</sub>	200.8
	R	11.4	14.3	543.7		R	18.2

图9为不同切削参数下,优化后的槽型车刀的切削性能。车削力与切削深度呈正比递增趋势,而进给速度和切削速度的变化对于车削力可忽略不计;切屑从前刀面流出时,由于与前刀面摩擦产生大量的热,当切削速度超过一定值时,会使大部分热量聚集在切屑底部而无法传入刀具及切屑前端,使温度升高,导致车削温度随切削速度增加而增大;进给量与切削深度对车削温度影响趋势与切削速度相反,原因是由于高温合金具备良好的塑性能力,导致进给量与切削深度较小时,极限卷曲半径较小,形成较薄较窄的切屑,无法体现断屑槽作用。切屑极限卷曲半径的增大使断屑更容易,因此,当增加进给量和切削深度时,会减小切屑与前刀面接触长度减小,降低摩擦力,随之降低切削温度。最优切削加工参

数为  $v_c = 25 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0.2 \text{ mm/r}$ ,  $a_p = 1.6 \text{ mm}$ 。

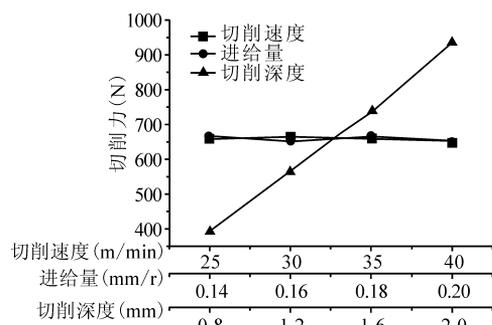


(a) 优化前后车削力

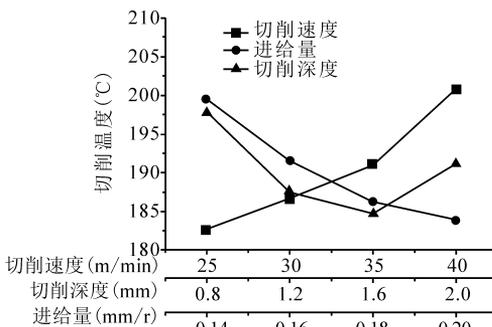


(b) 优化前后车削温度

图8 优化前后切削性能对比分析



(a) 优化后的车削力



(b) 优化后的车削温度

图9 槽型优化后切削参数对车刀切削性能的影响

## 4 结语

(1) 优化后的槽型车刀在刃口部分设计了钝圆刃口结构,在断屑槽起始位置设置了第一前角与第二前角,提高了刃口强度,刀具寿命增加;断屑槽内凸台使断屑槽实际作用槽宽减小,切屑向上卷曲半径变小,断屑更容易。

(2) 针状凸曲面相连与斜面第二凸台的设计使切屑与前刀面的接触减少,切屑经过针状凸曲面的过渡遇到斜面凸台阻碍,向上卷曲角度变大,卷曲半径进一步减小,切屑开始折断,切屑槽的断屑效果最好。

(3) 仿真证明了优化槽型后的车刀的车削力及车削温度均小于未优化槽型的车刀,槽型优化有效地改善了车刀的切削性能,最优的切削参数为  $v_c = 25 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0.2 \text{ mm/r}$ ,  $a_p = 1.6 \text{ mm}$ 。

## 参考文献

- [1] 师昌绪, 仲增墉. 中国高温合金 40 年 [J]. 金属学报, 1997, 33(1): 1-8.
- [2] 师昌绪, 仲增墉. 我国高温合金的发展与创新 [J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1281-1288.
- [3] K Nakayama. A study on chip-break [M]. r. Bulletin of JSME. 1962, 5(17): 142-150.
- [4] K Nakayama, M Arai et al. Cutting tool with curved rake face a means for breaking thin chip [J]. Annals of the CIRP, 1981, 30(1): 5-8.
- [5] 李振加. 切屑折断机理及其应用 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1990.
- [6] 李振加. 切屑折断过程与槽型 CAD 专家系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [7] 杨治国, 曾宪唐, 毛华仪, 等. 精车半精车时新型三维断屑槽型的研究 [J]. 机械, 1992, 19(2): 9-13.
- [8] 姜彬, 郑敏利, 张中民, 等. 刀片槽型对极限进给量的影响规律 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2000, 5(6): 29-32.  
第一作者: 李凌祥, 教授级高工, 厦门金鹭特种合金有限公司, 361000 厦门市  
First Author: Li Lingxiang, Professorate Senior Engineer, Xiamen Golden Heron Special Alloy Co., Ltd., Xiamen 361000, China  
通信作者: 万泉, 高级工程师, 哈尔滨理工大学, 150080 哈尔滨市  
Corresponding Author: Wan Quan, Senior Engineer, Harbin University of Technology, Harbin 150080, China