

# 车削 ZL109 铝合金 PCD 刀具的 几何参数优化仿真

周知进, 康红军

(湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** ZL109 铝合金对刀具的磨损严重, 难以获得较好的加工精度。而刀具几何参数对切削力、切削温度、表面加工质量和刀具耐用度都有重要的影响, 对刀具几何参数进行优化具有重要意义。利用材料试验机和 SHPB 装置对 ZL109 进行准静态和动态冲击压缩实验, 确定 ZL109 铝合金的本构模型参数。采用单因素试验法, 模拟刀具的前角、后角和刀尖圆弧半径对切削力和刀尖温度影响。结果表明: 刀尖圆弧半径对 X 和 Y 方向切削力的影响最大, 前角对 Z 方向切削力的影响最大, 而后角对刀尖温度的影响最大。通过正交试验法和极差分析, 当刀具几何参数选择为前角  $\gamma_0 = 0^\circ$ , 后角  $\alpha_0 = 7^\circ$ , 刀尖圆弧半径  $r = 0.4 \text{ mm}$  时, PCD 车刀切削 ZL109 铝合金时刀具的切削性能最优。

**关键词:** 刀具几何参数; 铝合金本构模型参数; 有限元方法; 切削力; 刀尖温度

**中图分类号:** TG506.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2017)02-0015-07

## Optimization of tool geometries of PCD tool for turning ZL109 through FEM simulation

Zhou Zhijin, Kang Hongjun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** ZL109 aluminum alloy makes the tools wear seriously, and it is very difficult to obtain high precision. Tool geometry has an important influence on the cutting force, cutting temperature, surface quality and tool life. Optimizing tool geometries is an important significance. The Johnson-Cook constitutive model parameters of ZL109 were tested by using materials testing machine and split hopkinson pressure bar apparatus. The influence of tool rake angle, clearance angle and nose radius on cutting force and peak tool temperature was simulated and analyzed by single factor design in the test. The simulation results have shown that nose radius is the most significant factor to cutting force in X and Y direction, rake angle is the most significant factor to Z direction cutting force, clearance angle is the most significant factor to peak tool temperature. Through the analysis of orthogonal test and range, the tool gets the best performance when rake angle is  $0^\circ$ , clearance angle is  $7^\circ$ , and nose radius is 0.4 mm.

**Keywords:** tool geometry; aluminum alloy constitutive model parameters; finite elements method; cutting force; peak tool temperature

ZL109 铝合金以其比重小、强度高、导热性好、耐腐蚀、耐磨、便于回收再利用等优点, 广泛应用于飞机、汽车、坦克及船用发动机等工业部门中。但从切削性能来看, ZL109 属于难加工材料, 刀屑易粘结, 形成积屑瘤, 影响加工表面质量。它对刀具磨料磨损也相当严重, 弹性模量较小, 后刀面摩擦严重, 对刀具的耐

用度有很大的影响.通过优化PCD刀具的几何参数,充分发挥刀具的切削性能,成为了提高ZL109加工效率的有效途径.

针对ZL109铝合金的Johnson-Cook本构模型参数标定,目前为止国内外文献还未见报道.AdvantEdge FEM有限元软件的工件材料库中也没有ZL109铝合金材料,为了能进行随后的模拟仿真分析,通过准静态和动态压缩实验确定ZL109的本构模型参数.

PCD刀具车削铝合金时,刀具几何参数对切削力和切削温度的影响,有很多学者进行了大量的仿真和研究.贾特等<sup>[1]</sup>研究了在PCD刀具车削铝合金6063A的过程中,刀具的前角、后角和刀尖圆弧半径分别对加工表面质量的影响.张建华等<sup>[2]</sup>通过PCD刀具车削加工BH122A硅铝合金活塞实验,结果表明:刀尖圆弧半径的最佳范围值为0.8~0.35 mm,在此范围内活塞的加工表面粗糙度较小,刀具的合理后角值为6°~9°.冯吉福等<sup>[3]</sup>研究了在PCD刀具车削硅含量为20%的硅铝合金时,切削速度对切削温度和表面粗糙度的影响.北京航空航天大学刘东和陈五一<sup>[4]</sup>研究了金刚石刀具车削含硅12%的共晶硅铝合金时,切削速度和进给量对切削力和切削温度的影响,结果表明:为了降低切削区温度,进给量不易太大,当切削速度为160~200 m/min时,切削力较小.合肥工业大学韩慧等<sup>[5]</sup>通过金刚石涂层干切削ZL108铝合金实验,当 $f=0.1$  mm/r,  $a_p=0.1$  mm,  $V_c \geq 260$  m/min时,工件表面粗糙度可稳定保持在0.5  $\mu$ m左右.王进保等<sup>[6]</sup>通过金刚石复合刀片车削含硅20%的铸态高硅铝合金实验,分析了切削用量对切削力和表面粗糙度的影响,发现进给量和背吃刀量是影响切削力的主要因素,切削速度对切削力的影响很小,小进给量、高切削速度有助于提高工件表面光洁度. Shippeng<sup>[7]</sup>采用有限元仿真的方法,对不同刀具前角下的切削过程进行了分析研究. Gunay等<sup>[8]</sup>通过实验研究,阐述了刀具前角对主切削力的影响规律. Zong等<sup>[9]</sup>采用有限元模拟金刚石刀具切削铝合金,分析了刀尖圆弧半径、前角和后角对表面残余应力的影响,结果表明:前角10°,后角6°,刀尖圆弧半径尽量小时,表面残余应力最小.在已有的这些研究中,具体针对PCD刀具车削ZL109铝合金,就优化刀具几何参数进行仿真分析的还存在空白.本文通过AdvantEdge FEM有限元软件结合本构模型参数自定义ZL109铝合金材料,模拟刀具几何参数对切削力和切削温度的影响,从而优化刀具的几何参数.

## 1 ZL109本构模型参数的确定

Johnson-Cook材料本构模型<sup>[10]</sup>是一个能反映应变硬化、应变率强化效应和温度软化效应的理想刚塑性强度模型.这种模型适用于描述金属材料在大变形、高应变率和高温度条件下的本构模型,其表达式如下:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*m}]; \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}; \quad (2)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}. \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 为屈服应力,MPa; $\varepsilon$ 为等效塑性应变(无量纲量); $\dot{\varepsilon}$ 为应变率, $s^{-1}$ ;  $\varepsilon_0$ 为参考应变率, $s^{-1}$ ;  $T$ 为材料温度, $^{\circ}C$ ;  $T_r$ 为室温, $^{\circ}C$ ;  $T_m$ 为材料熔点, $^{\circ}C$ .式中其余5个参数 $A, B, C, m$ 和 $n$ 都是与材料相关的系数.其中, $A$ 为材料在准静态下的屈服强度; $B$ 和 $n$ 为应变强化参数; $C$ 为应变率敏感系数; $m$ 为温度软化系数.在Johnson-Cook本构关系中,等号右边第1个括号中的式子表示应变强化效应, $\sigma$ 是 $\varepsilon$ 的函数.

通过利用材料试验机和SHPB<sup>[11-12]</sup>装置对ZL109进行准静态和动态冲击压缩实验,并将实验数据进行处理,得到了ZL109铝合金的Johnson-Cook本构方程参数,其中, $A$ 为143.72 MPa; $B$ 为36.43 MPa; $C$ 为0.011; $m$ 为0.62; $n$ 为0.26.

## 2 刀具几何参数的有限元仿真

### 2.1 切削加工仿真参数的设定

PCD聚晶金刚石车刀车削ZL109铝合金作为研究对象,以前角2°,后角9°,刀尖圆弧半径1 mm的

PCD 车刀切削为例, AdvantEdge FEM 仿真参数设定如下:

1) 几何模型: 刀具: 前角  $2^\circ$ , 后角  $9^\circ$ , 切削刃半径  $0.04 \text{ mm}$ ; 工件: 长度  $6 \text{ mm}$ , 高度  $3 \text{ mm}$ .

2) 材料模型: 刀具: PCD 聚晶金刚石; 工件: ZL109 铝合金. 由于 AdvantEdge FEM 软件本身自带的工件材料库中没有 ZL109 铝合金, 为实现该材料的切削仿真, 使用软件自带的 Custom Materials 材料自定义模块, 选择 Johnson-Cook 本构模型定义材料方式定义 ZL109 铝合金<sup>[13]</sup>. 其部分物理力学性能可以根据机械工程材料手册<sup>[14]</sup>查得, 其中  $k$ : 热传导率,  $117.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $c$ : 比热容,  $963 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\rho$ : 密度,  $2680 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $E$ : 杨氏模量,  $7.2 \times 10^{10}$ ;  $Pr$ : 泊松比,  $0.3$ .

3) 切削参数: 本例采用的是粗车外圆工艺参数, 其中进给量  $f$  为  $1 \text{ mm}/\text{r}$ , 背吃刀量  $d_{oc}$  为  $2 \text{ mm}$ , 切削速度  $V$  为  $230 \text{ m}/\text{min}$ , 切削长度  $l_{oc}$  为  $5 \text{ mm}$ , 初始温度  $T_0$  为  $20^\circ\text{C}$ .

## 2.2 结果与分析

在切削加工过程中, 刀具的几何参数对切削性能有重要的影响, 合理选择刀具的几何参数, 在保证表面加工质量的同时, 能提高刀具的耐用度, 充分发挥刀具的切削性能, 对加工效率和经济效率都有很大的提高.

### 2.2.1 刀具前角对切削性能的影响

前角对切削的变形和摩擦有很大的影响, 同时也能影响到刀具的强度. 前角的增大可以让切削变形和摩擦减小, 并由此使得切削力变小, 切削热减少, 加工表面质量提高, 但会导致刀具强度降低, 热传导性变差. 因此, 选择一个合理的前角, 对刀具耐用度的提高有重要的影响.

为了研究 PCD 刀具在车削铝合金时, 其前角对切削性能的影响情况, 采用单因素法对 PCD 刀加工 ZL109 的过程进行模拟仿真. 切削用量三要素选取半精车活塞外圆参数保持不变, 只对刀具前角进行改变. 前角分别为  $-10^\circ$ ,  $-4^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $12^\circ$  和  $18^\circ$ .

图 1 和图 2 分别是通过有限元仿真软件 AdvantEdge 模拟 PCD 刀车削 ZL109 铝合金, 当切削过程达到稳定情况下, 平均切削力和刀尖温度随前角变化曲线图.

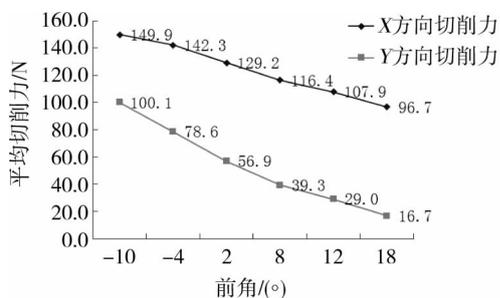


图1 切削力随前角变化

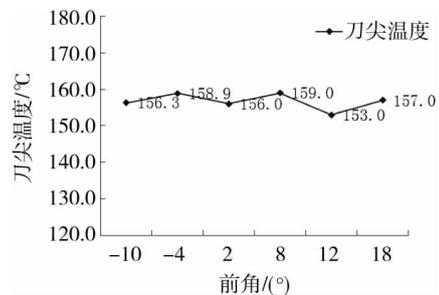


图2 刀尖温度随前角变化

由图 1 可以看出, 随着刀具前角的增大, 刀具的平均切削力呈下降趋势. 这主要是因为前角增大时, 切削角也会相应增大, 切削变形会减小, 切屑对前刀面的摩擦阻力也会减小, 从而导致在切削过程中, 2 个方向的平均切削力都随前角增大而减小. 这与传统经验得出的结论是一致的. 图 2 可以得出, 刀具的最高温度随前角的增大基本呈波动状态. 根据传统理论, 当刀具为负前角时, 刀尖温度随前角增大而下降, 这主要是由于工件的变形程度很大, 使得切屑对前刀面的摩擦严重, 产生了大量的切削热, 排屑比较困难, 散热条件差, 而当负前角增大时, 这些问题都能得到极大地改善, 从而使刀尖温度下降得非常明显. 刀具为正前角后, 这种影响不再那么明显. 相反, 过大的刀具前角会使刀具的热传导性变差, 刀体变薄, 散热条件变差, 所以当正前角继续增大后, 刀具的最高温度可能出现上升. 而图示仿真结果基本呈波动状态, 可能与网格设置、本构模型参数以及数据处理有关.

### 2.2.2 刀具后角对切削性能的影响

后角  $\alpha_0$  主要影响后刀具和工件已加工表面间的摩擦, 对刀具耐用度影响极大. 增大后角, 可以减少刀具与工件间的挤压摩擦, 提高刀具的耐用度, 但随着后角的增大, 这种影响越来越小, 相反, 过大的后角会降低刀具强度, 热传导性也会变差, 从而会大大降低刀具寿命.

后角的大小主要由切削厚度和工件材料决定.当切削厚度较大时,刀具的磨损主要发生在前刀面,应选择较小的后角以提高刀具强度;当切削厚度较小时,刀具的磨损主要集中到了后刀面,选择较大的后角可以减少后刀面与已加工表面的摩擦.工件材料也决定了刀具后角的选择.当加工塑性较大的材料时,材料的弹性恢复较大,应选择较大的后角以减少后刀面对工件的摩擦;当加工塑性较小,硬度较大的材料时,为保证刀具强度,提高刀具耐用度,应选择较小的后角.

同样,为了研究 PCD 刀具在车削铝合金时,其后角对切削性能的影响情况,则选取不同的刀具后角进行切削模拟仿真,后角具体为  $2^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $9^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $16^\circ$  和  $20^\circ$ .

通过有限元仿真软件 AdvantEdge 模拟 PCD 刀车削 ZL109 铝合金,当切削过程达到稳定情况下,平均切削力和刀尖温度随后角变化曲线图分别如图 3 和图 4 所示.

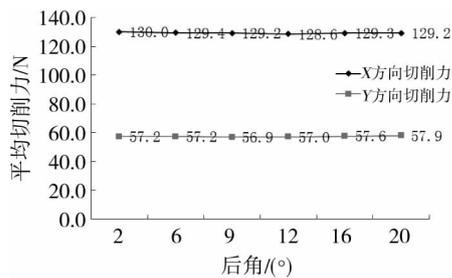


图3 切削力随后角变化

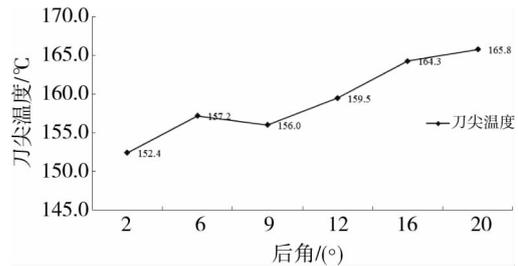


图4 刀尖温度随后角变化

由图 3 和图 4 可以得出,PCD 车刀后角的变化对刀具的平均切削力的影响并不是很大,基本在一个小范围内进行波动.而刀尖温度随后角变化的大体趋势是呈上升状态.后角对刀具切削性能的影响还是比较大的,尤其是在加工塑性较大的工件时,由于已加工表面的弹性恢复大,会对刀具后刀面的磨损产生影响.而过大的后角能增加刀具的锋利程度但会大大降低刀具的热传导性.图 4 刀尖温度呈上升趋势就是由于刀具的热传导性变差引起的,过高的刀具温度会降低刀具的使用寿命.因此,合理选择刀具后角对提高刀具切削性能有很重要的影响.

### 2.2.3 刀具刀尖圆弧半径对切削性能的影响

刀具刀尖圆弧半径对刀具切削性能具有重要的影响.当增大刀尖圆弧半径时,可以增加刀尖强度,改善散热条件,提高刀具耐用度,降低已加工表面粗糙度.但过大的刀尖圆弧半径,会让圆弧刀刃参加工作的比例增加,切削变形和摩擦增大,切削力也增大,使工艺系统容易产生振动.

刀尖圆弧半径主要也是根据切削厚度和工件材料来选择的.当工件材料的强度较高,硬度较大,切削厚度也较大时,应该选择较大的刀尖圆弧半径以提到刀尖强度,提高刀具耐用度;反之,应该选择较小的刀尖圆弧半径以减少刀具的背向力,从而减少工艺系统的振动.此外,刀具圆弧半径的选择与工艺系统的刚性也有关.对应工艺系统刚性较大的,可以选择较大的刀尖圆弧半径.

同样,为了研究 PCD 刀具在车削铝合金时,其刀尖圆弧半径对切削性能的影响情况,选取不同的刀具刀尖圆弧半径进行切削模拟仿真,刀具圆弧半径分别为 0.2, 0.4, 0.8, 1.2 和 1.6 mm.

通过有限元仿真软件 AdvantEdge 模拟 PCD 刀车削 ZL109 铝合金,当切削过程达到稳定情况下,平均切削力和刀尖温度随刀尖圆弧半径变化曲线图分别如图 5 和图 6 所示.

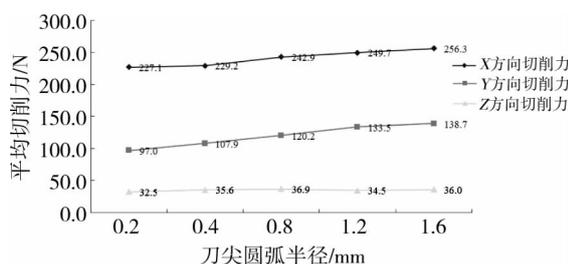


图5 切削力随刀尖圆弧半径变化

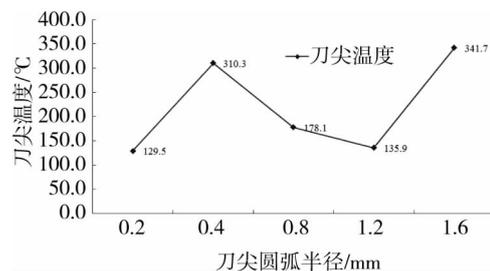


图6 刀尖温度随刀尖圆弧半径变化

由图 5 和图 6 可以得出,刀具的平均切削力随刀具刀尖圆弧半径的增加而增大.刀尖圆弧半径越大,圆弧刀刃参加工作比例越多,切削变形和摩擦越大,切削力也增大.此外,由于圆弧刀刃上主偏角是变化的,随着刀尖圆弧半径的增大,参加工作刀刃上主偏角的平均值减小,切削厚度将会减小,切削变形增大,故切削力也将增大.而刀尖温度随刀尖圆弧半径的增加先是上升,之后有下降,最后再上升.当刀尖圆弧半径增大时,平均主偏角减小,切削厚度也随之减小,此时会随着切削力的增大而导致生热的增加.随着刀尖圆弧半径继续增大,切削刃的工作长度变长,刀尖变钝,刀具散热条件变好,散热条件的影响超过切削力的影响,切削温度将下降.最后,散热条件的影响变小,切削力成为主要影响因素,刀具切削温度将上升.因此,合理选择刀具刀尖圆弧半径对提高刀具切削性能有很重要的影响.

#### 2.2.4 刀具几何参数的正交试验法分析

通过单因素法仿真模拟,分析了各个因素对切削性能的影响.但在实际的切削过程中,往往是由多个因素相互作用,共同影响.因此,为了实现优化刀具几何参数目的,应选择正交试验法对刀具几何参数进行分析<sup>[15]</sup>.本试验的因素有 3 个:前角、后角和刀尖圆弧半径,每个因素又有多个水平,如果将每组试验都进行有限元模拟,需要花费大量的时间,因此,本研究采取的是减少试验组数的正交试验法,它仍能保证试验的代表性.具体正交试验仿真结果如表 1 所示.

表 1 正交试验仿真结果

试验编号	前角 $\gamma_0 / (^{\circ})$	后角 $\alpha_0 / (^{\circ})$	刀尖圆弧半径 $r / \text{mm}$	平均切削力/N			刀尖温度 $T / ^{\circ}\text{C}$
				$F_x$	$F_y$	$F_z$	
1	1(0)	1(5)	1(0.4)	231.6	103.7	39.4	174.0
2	2(2)	1	2(0.8)	256.6	123.0	36.0	327.0
3	3(8)	1	3(1.2)	242.4	135.4	20.2	249.7
4	1	2(7)	2	247.7	121.9	43.9	107.1
5	2	2	3	249.7	133.5	34.5	135.9
6	3	2	1	192.1	87.3	19.5	191.9
7	1	3(11)	3	236.4	102.3	39.7	248.7
8	2	3	1	229.5	104.8	32.9	191.1
9	3	3	2	225.6	110.7	18.5	204.5

根据  $X$  方向切削力的极差分析表,可以看出  $R_C > R_A > R_B$ , 这说明影响  $X$  方向切削力最主要的因素是刀具圆弧半径,其次是前角,而后角对  $X$  方向切削力的影响最小.以  $X$  方向切削力作为研究目标,结合表 2 中各个水平的平均切削力,优化的刀具几何参数组合为  $A_3B_2C_1$ .

根据  $Y$  方向切削力的极差分析表,可以看出  $R_C > R_B > R_A$ , 这说明影响  $Y$  方向切削力最主要的因素是刀尖圆弧半径,其次是后角,而前角对  $Y$  方向切削力的影响最小.以  $Y$  方向切削力作为研究目标,结合表 3 中各个水平的平均切削力,优化的刀具几何参数组合为  $A_1B_3C_1$ .

表 2  $X$  方向切削力的极差分析表

	A(前角)	B(后角)	C(刀尖圆弧半径)
I	238.6	243.5	217.7
II	245.3	229.8	243.3
III	220.0	230.5	242.8
R	25.3	13.7	25.6

表 3  $Y$  方向切削力的极差分析表

	A(前角)	B(后角)	C(刀尖圆弧半径)
I	109.3	120.7	98.6
II	120.4	114.2	118.5
III	111.1	105.9	123.7
R	11.1	14.8	25.1

根据  $Z$  方向切削力的极差分析表,可以看出  $R_A > R_B = R_C$ , 这说明影响  $Z$  方向切削力最主要的因素是前角,后角和刀尖圆弧半径对  $Z$  方向切削力的影响一样.以  $Z$  方向切削力作为研究目标,结合表 4 中各个水平的平均切削力,优化的刀具几何参数组合为  $A_3B_3C_1$ .

根据刀尖温度的极差分析表,可以看出  $R_B > R_A > R_C$ , 这说明影响刀尖温度最主要的因素是后角,其次是前角,而刀具圆弧半径对刀尖温度的影响最小.以刀尖温度作为研究目标,结合表 5 中各个水平的平均刀尖温度,优化的刀具几何参数组合为  $A_1B_2C_1$ .

表4 Z方向切削力的极差分析表

	A(前角)	B(后角)	C(刀尖圆弧半径)
I	41.0	31.9	30.6
II	34.5	32.6	32.8
III	19.4	30.4	31.5
R	21.6	2.2	2.2

表5 刀尖温度的极差分析表

	A(前角)	B(后角)	C(刀尖圆弧半径)
I	176.6	250.2	185.7
II	218.0	145.0	212.9
III	215.4	214.8	211.4
R	41.4	105.2	27.2

由于以上3个试验指标单独进行极差分析得出的优化结果不一致,需要结合各因素的影响主次,综合考虑,得到最优的刀具几何参数.对于前角来说,它是Z方向切削力的主要影响因素,其对X方向切削力和刀尖温度的影响都排在第二位,对Y方向切削力的影响为最小,可以选择 $A_1$ 或者 $A_3$ .在X和Z方向切削力方面, $A_3$ 比 $A_1$ 分别降低了7.80%和52.68%,在Y方向切削力和刀尖温度上, $A_3$ 比 $A_1$ 分别提高了1.65%和21.97%,前角应选择 $A_3$ ,但考虑到Z方向切削力上 $A_1$ 仅为41.0 N,而在刀尖温度上 $A_1$ 为176.6 °C,因此,刀具前角选择 $A_1$ .而对于后角来说,它是刀尖温度最主要的影响因素,对Y方向切削力的影响排在第二位,而对X和Z方向切削力的影响均为最小.后角对切削力的影响非常小,主要考虑其对刀尖温度的影响,后角应选择 $B_2$ 或者 $B_3$ .在X方向切削力和刀尖温度方面, $B_2$ 比 $B_3$ 分别降低了0.30%和32.50%,而在Y和Z方向切削力上, $B_2$ 只比 $B_3$ 提高了7.84%和7.24%,因此,后角应取 $B_2$ .与后角刚好相反,刀尖圆弧半径是X和Y方向切削力的主要影响因素,它对Z方向切削力的影响也排在第二位,但在刀尖温度方面,它的影响是最小的,考虑其对切削力的影响,刀尖圆弧半径应取 $C_1$ .综合以上考虑,得到的最优刀具几何参数组合为 $A_1B_2C_1$ .

## 2.3 验证

### 2.3.1 仿真结果验证

为了验证优化后刀具几何参数是否满足要求,对最优组合 $A_1B_2C_1$ 进行有限元模拟仿真.将仿真结果与原有结构参数的仿真结果进行对比分析,从而验证优化结果的可行性.刀具原有结构参数为前角 $\gamma_0 = 2^\circ$ ,后角 $\alpha_0 = 9^\circ$ ,刀尖圆弧半径 $r = 1 \text{ mm}$ ,但在AdvantEdge的三维仿真中,无法将后角和刀尖圆弧半径定义为任意的值,只能定义为某些特定的值,因此,假定刀具原有结构参数为前角 $\gamma_0 = 2^\circ$ ,后角 $\alpha_0 = 7^\circ$ ,刀尖圆弧半径 $r = 1.2 \text{ mm}$ .其他切削条件保持不变,通过仿真模拟后,得到优化前后的结果,如表6所示.

表6 仿真结果对比表

对比因素	前角 $\gamma_0 / (^\circ)$	后角 $\alpha_0 / (^\circ)$	刀尖圆弧半径 $r / \text{mm}$	平均切削力/N			刀尖温度 $T / ^\circ\text{C}$
				$F_x$	$F_y$	$F_z$	
优化前	2	7	1.2	249.7	133.5	34.5	135.9
优化后	0	7	0.4	238.5	105.5	39.1	105.2

根据仿真结果对比表,可以得到在X,Y方向切削力和刀尖温度上,优化后比优化前分别减小了4.49%,20.97%和22.59%,在Z方向切削力上增加了4.6 N,增大了13.33%.从结果来看,优化后的刀具结构是可行的.

### 2.3.2 实验结果验证

为了验证仿真结果,将仿真得到的最优结构参数的刀具与原有结构参数的刀具分别进行切削实验.刀具原有结构参数为前角 $\gamma_0 = 2^\circ$ ,后角 $\alpha_0 = 9^\circ$ ,刀尖圆弧半径 $r = 1 \text{ mm}$ ,仿真优化后的结构参数为前角 $\gamma_0 = 0^\circ$ ,后角 $\alpha_0 = 7^\circ$ ,刀尖圆弧半径 $r = 0.4 \text{ mm}$ .其他切削条件与仿真设置相同,通过切削实验后,得到优化前后的结果,如表7所示.

表7 实验结果对比表

对比因素	前角 $\gamma_0 / (^\circ)$	后角 $\alpha_0 / (^\circ)$	刀尖圆弧半径 $r / \text{mm}$	平均切削力/N		
				$F_x$	$F_y$	$F_z$
优化前	2	9	1.0	122.60	32.15	21.92
优化后	0	7	0.4	103.50	25.04	19.46

根据实验结果对比表,可以得到在  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  方向切削力上,优化后比优化前分别减小了 18.45%, 22.12% 和 11.22%,从结果来看,优化后的刀具结构是可行的。

### 3 结语

确定了 ZL109 铝合金的 Johnson-Cook 本构方程参数,研究了刀具前角、后角和刀尖圆弧半径变化对切削力和刀尖温度的影响,得到如下结论:

- 1) 刀尖温度随刀具前角的增大基本保持不变,但当刀尖圆弧半径增大时,刀尖温度波动很大。
- 2) 对于  $X$  和  $Y$  方向切削力,刀尖圆弧半径都是主要影响因素,而对于  $Z$  方向切削力,前角的影响为最大。
- 3) 对于刀尖温度,后角的影响最大,其次是前角,刀尖圆弧半径影响最小。
- 4) 当刀具几何参数选择为前角  $\gamma_0 = 0^\circ$ ,后角  $\alpha_0 = 7^\circ$ ,刀尖圆弧半径  $r = 0.4 \text{ mm}$  时,PCD 车刀切削 ZL109 铝合金时刀具的切削性能为最优。

### 参考文献:

- [1] 贾特,李嫚,张弘毅,等. PCD 刀具几何参数对铝合金加工表面粗糙度的影响[J]. 机械工程师,2007(1):39-41.
- [2] 张建华,尚自河. 车削硅铝合金活塞的 PCD 刀具刃磨及几何参数[J]. 山东大学学报(工学版),2005,35(5):5-8.
- [3] 冯吉福,林峰,李立惟,等.PDC 刀具切削硅铝合金的表面粗糙度研究[J].超硬材料工程,2013,25(3):6-10.
- [4] 刘东,陈五一.硅铝合金车削中切削力和切削温度的研究[J].有色金属,2006,58(1):39-41.
- [5] 韩慧,杨海东,张崇高.金刚石和氮化碳涂层刀具加工高硅铝合金[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2007,30(1):66-67.
- [6] 王进保,李立惟,姜伟,等.PDC 刀具切削参数对切削力和表面粗糙度的影响[J].工具技术,2010,44(10):26-29.
- [7] Shippeng L. An analysis of cutting under different rake angles using the finite element method[J]. Journal of Materials Processing Technology,2000,105(1/2):143-151.
- [8] Gunay M, Kokrut I, Aslan E, et al. Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005,166(1):44-49.
- [9] Zong W J, Li D, Cheng K, et al. Finite element optimization of diamond tool geometry and cutting-process parameters based on surface residual stresses[J].International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2007,32(7):666-674.
- [10] 常列珍,潘玉田,张治民,等.一种调质 50SiMnVB 钢 Johnson-Cook 本构模型的建立[J].兵器材料科学与工程,2010,33(4):68-72.
- [11] Lee O S, Kimb M S. Dynamic material property characterization by using split hopkinson pressure bar(SHPB)technique[J]. Nuclear Engineering and Design,2003, 226(2):119-125.
- [12] Zhao H. Material behaviour characterisation using SHPB techniques, tests and simulations[J]. Computers and Structures, 2003, 81(12):1301-1310.
- [13] 万修龙. 金属本构数值建模和切削仿真加工参数优化[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [14] 中国第一汽车集团公司编写组. 机械工程材料手册:金属材料[M].5版.北京:机械工业出版社,1998.
- [15] 贾特,李嫚,贾乾忠,等.基于正交试验的 PCD 刀具加工铝合金时切削性能的研究[J].轻合金加工技术,2007,35(1):46-48.