

# 切削参数对 34CrNiMo6 高强度钢切削力影响的仿真研究

刘玮<sup>1</sup>, 张莹<sup>2</sup>, 李伟<sup>2</sup>, 王书利<sup>2</sup>

<sup>1</sup>沈阳理工大学装备工程学院; <sup>2</sup>内蒙古北方重工业集团有限公司

**摘要:** 通过仿真研究高强度钢的切削力, 建立高强度钢切削力的仿真模型。在 AdvantEdge 有限元仿真软件的基础上, 运用正交试验方案分析切削用量对主切削力、进给抗力的影响规律, 获得了该研究范围内切削用量的最优方案, 建立了经验公式。结果表明, 切削力仿真模型精度较好, 切削深度对高强度钢切削力影响最大, 主切削力和进给抗力均随切削速度的增大而减小, 且主切削力  $F_c$  约为进给抗力  $F_f$  的两倍。

**关键词:** 高强度钢; 主切削力; 进给抗力; 切削深度; 切削速度

中图分类号: TG501.1; TH16

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2020.03.011

## Simulation Study on Effect of Cutting Parameters on Cutting Force of High Strength Steel 34CrNiMo6

Liu Wei, Zhang Ying, Li Wei, Wang Shuli

**Abstract:** Through the simulation research of high-strength steel cutting force, the simulation model of cutting force of high-strength steel is established. Based on the AdvantEdge finite element simulation software, using the orthogonal simulation method to analyze the influence of cutting parameters on main cutting force and feed resistance, the optimal scheme of cutting parameters in the research range is obtained, and the empirical formula is established. The results show that the cutting force simulation model is accurate, the cutting depth has the greatest influence on the cutting force of high-strength steel, the main cutting force and feed resistance are decreased with the increase of cutting speed, and the main cutting force  $F_c$  is about twice of the feed resistance  $F_f$ .

**Keywords:** high-strength steel; main cutting force; feed resistance; cutting depth; cutting speed

## 1 引言

高强度钢材料因其优良的性能广泛应用于国防、电力和交通运输等各个行业。此类材料不但强度高, 而且加工硬化严重, 发生切削塑性变形时奥氏体组织还会转变为细晶粒的马氏体组织, 大幅增加材料硬度<sup>[1]</sup>, 产生较大的切削力, 导致切削加工困难。由于切削力对夹具、刀具和机床等工艺系统的设计精度有重要影响<sup>[2]</sup>, 而且是选择切削用量时重要考虑因素, 为合理制定切削用量, 提高切削加工效率和质量, 对高强度钢切削力的研究具有重要意义。

Zhu R. 等<sup>[3]</sup>和 Smithy D. W. 等<sup>[4]</sup>结合经验法和解析法研究切削力的建模和预报工作, 通过大量的预先试验总结出具有一定精度的切削力经验公式; 马廉洁等<sup>[5]</sup>利用遗传算法建立了车削陶瓷材料的切削力多元模型并通过试验验证了其可靠性; 李登万<sup>[6]</sup>采用均匀设计试验参数方法, 研究切削参数与切削力的关系, 建立了钛合金切削力经验公式; 张蓉蓉等<sup>[7]</sup>基于 DEFORM-3D 研究了切削 7075 铝合金时切削参数对切削力的影响规律, 得到切削用量

对切削力影响的主次顺序。

本文基于 AdvantEdge 有限元仿真软件建立了 34CrNiMo6 高强度钢的切削仿真模型, 研究切削加工高强度钢时切削参数对切削力的影响规律。

## 2 仿真建模

### 2.1 本构模型和接触摩擦模型

材料采用幂指数模型, 其数学表达式为

$$\sigma(\varepsilon^p, \dot{\varepsilon}, T) = g(\varepsilon^p) \Gamma(\dot{\varepsilon}) \Theta(T) \quad (1)$$

式中,  $g(\varepsilon^p)$  为应变硬化项;  $\Gamma(\dot{\varepsilon})$  为应变率敏感项;  $\Theta(T)$  为热软化项。

如果  $\varepsilon^p < \varepsilon_{cut}^p$ , 则应变硬化项表达式为

$$g(\varepsilon^p) = \sigma_0 \left( 1 + \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_0^p} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

如果  $\varepsilon^p \geq \varepsilon_{cut}^p$ , 则

$$g(\varepsilon^p) = \sigma_0 \left( 1 + \frac{\varepsilon_{cut}^p}{\varepsilon_0^p} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

式中,  $\sigma_0$  为初始屈服应力;  $\varepsilon^p$  为塑性应变;  $\varepsilon_{cut}^p$  为切断应变;  $\varepsilon_0^p$  为参考塑性应变;  $n$  为应变硬化指数。

如果  $\dot{\varepsilon} \leq \dot{\varepsilon}_1$ , 则应变敏感项表达式为

$$\Gamma(\dot{\varepsilon}) = \left( 1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^{\frac{1}{m_1}} \quad (4)$$

如果  $\dot{\varepsilon} > \dot{\varepsilon}_1$ , 则

$$\Gamma(\varepsilon) = \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{\frac{1}{m_2}} \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{\left(\frac{1}{m_1} - \frac{1}{m_2}\right)} \quad (5)$$

式中,  $\dot{\varepsilon}$  为应变率;  $\dot{\varepsilon}_0$  为参考塑性应变率;  $\dot{\varepsilon}_1$  为转变应变率;  $m_1, m_2$  分别为低应变率和高应变率敏感指数。

如果  $T < T_{cut}$ , 则热软化项表达式为

$$\Theta(T) = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4 + c_5 T^5 \quad (6)$$

如果  $T \geq T_{cut}$ , 则有

$$\Theta(T) = \Theta(T_{cut}) \left(1 - \frac{T - T_{cut}}{T_{melt} - T_{cut}}\right) \quad (7)$$

式中,  $c_0 \sim c_5$  为多项式拟合系数;  $T$  为温度;  $T_{cut}$  为线性切断温度;  $T_{melt}$  为材料熔点温度。

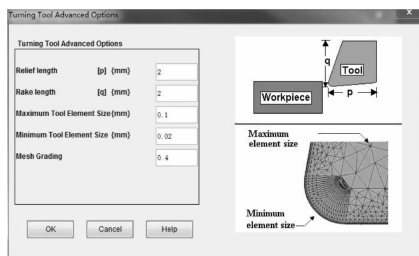
接触摩擦模型选择库伦摩擦模型<sup>[8]</sup>, 摩擦系数设为 0.5, 表达式为

$$\tau_f = \mu p \quad (8)$$

式中,  $\tau_f$  为摩擦力;  $\mu$  为摩擦系数;  $p$  为正压力。

### 2.2 建立加工模型

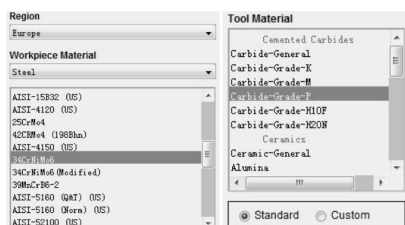
创建车削工件和刀具模型, 设定工件的长度为 5mm, 高度为 2mm; 设定刀具前角为  $5^\circ$ , 后角为  $8^\circ$ , 刃口半径为 0.02mm。按图 1 所示参数对车削刀具进行网格划分, 设置工件网格的最大单元尺寸为 0.1mm, 最小单元尺寸为 0.02mm。



( $\rho = 0.02\text{mm}, \gamma_0 = 5^\circ, \alpha_0 = 8^\circ$ )

图 1 刀具网格划分

为了便于仿真, AdvantEdge 有限元仿真软件提供了包含多种常用材料的材料库。选择工件和刀具的材料见图 2。在 AdvantEdge 的车削工艺参数中, 以进给量为 0.4mm/r、车削深度为 2mm、切削长度为 5mm、切削速度为 100m/min、初始温度为  $20^\circ$  为例, 切削用量设置效果见图 3。



(a) 工件材料 (b) 刀具材料

图 2 设置工件和刀具材料

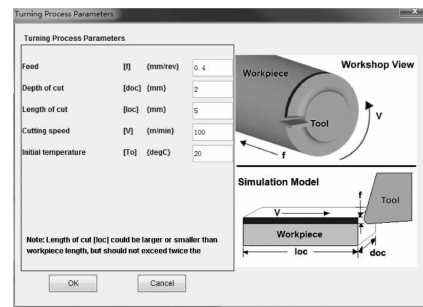
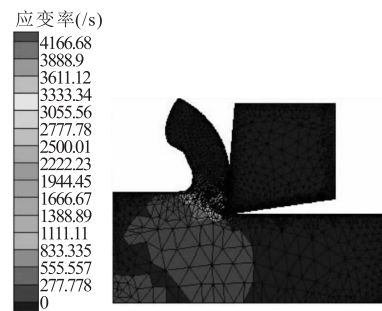


图 3 设置切削用量

图 4 为仿真得到的 34CrNiMo6 高强度钢正交切削过程。仿真切削力如图 5 所示, 图中  $F_c$  为主切削力,  $F_f$  为进给抗力。



( $v_c = 100\text{m/min}, a_p = 2\text{mm}, f_a = 0.4\text{mm/r}$ , 干切削)

图 4 切削仿真过程

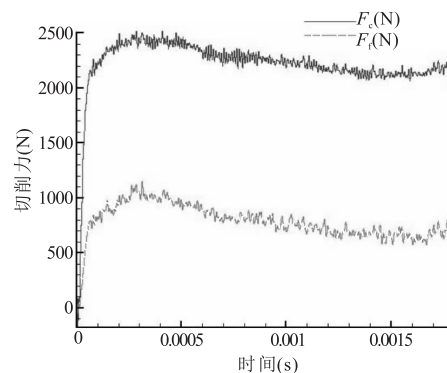


图 5 仿真瞬时切削力

34CrNiMo6 高强度钢的抗拉强度为 1300N/mm<sup>2</sup>, 由文献[9]可知, 此类高强度钢的主切削力计算公式为

$$F_c = AK_c h^{-m} \quad (9)$$

式中,  $F_c$  为主切削力 (N);  $K_c$  为单位切削力 (N/mm<sup>2</sup>);  $h$  为切削厚度 (mm);  $m$  为修正系数;  $A$  为切屑截面积 (mm<sup>2</sup>)。

切屑截面积  $A$  的公式可表示为

$$A = a_p f_a \cos |\kappa_r - 90| \quad (10)$$

式中,  $a_p$  为切削深度 (mm);  $f_a$  为进给量 (mm/r);  $\kappa_r$  为刀具主偏角 ( $^\circ$ )。

查阅文献[9]并由切削试验得到的抗拉强度为1100~1400N/mm<sup>2</sup>,高合金钢的单位主切削力  $K_c = 2500\text{N/mm}^2$ ,修正系数  $m = 0.25$ 。

由此计算得到在  $a_p = 2\text{mm}, f_a = 0.4\text{mm/r}, \kappa_r = 90^\circ$  条件下的主切削力为2514.87N。从图5可知,稳定车削时的仿真主切削力约为2350N。由此可以看出主切削力的仿真结果与刀具切削手册的计算结果偏差约为6.5%,证明该仿真模型有效。

### 3 仿真试验

#### (1) 仿真研究方案

为研究刀具切削参数对切削力的影响规律,以切削速度  $v_c$ 、进给量  $f_a$ 、切削深度  $a_p$  为3个主要因素,建立3因素4水平的正交仿真研究方案,仿真方案如表1所示。

表1  $L_{16}(4^3)$  正交仿真试验方案

水平	因素		
	A 切削速度 $v_c$ (m/min)	B 进给量 $f_a$ (mm/r)	C 切削深度 $a_p$ (mm)
1	100	0.1	0.5
2	200	0.2	1
3	300	0.3	1.5
4	400	0.4	2

仿真刀具几何角度统一选择为:刃口半径  $\rho = 0.02\text{mm}$ ,前角  $\gamma_0 = 5^\circ$ ,后角  $\alpha_0 = 8^\circ$ ,切削方式为干切削。

#### (2) 正交仿真结果

根据  $L_{16}(4^3)$  正交试验方案进行仿真研究,得到主切削力  $F_c$ 、进给抗力  $F_f$  见表2。

表2  $L_{16}(4^3)$  正交仿真试验切削力值

序号	切削速度 $v_c$ (m/min)	进给量 $f_a$ (mm/r)	切削深度 $a_p$ (mm)	主切削力 $F_c$ (N)	进给抗力 $F_f$ (N)
1	100	0.1	0.5	207.80	125.38
2	100	0.2	1	715.57	352.04
3	100	0.3	1.5	1587.50	688.15
4	100	0.4	2	2529.80	1191.67
5	200	0.1	1	426.09	215.94
6	200	0.2	0.5	351.52	184.99
7	200	0.3	2	1936.90	888.71
8	200	0.4	1.5	1929.42	817.09
9	300	0.1	1.5	564.64	306.60
10	300	0.2	2	1355.95	661.35
11	300	0.3	0.5	485.60	220.07
12	300	0.4	1	1221.58	520.31
13	400	0.1	2	733.82	419.74
14	400	0.2	1.5	1006.48	471.07
15	400	0.3	1	948.83	441.46
16	400	0.4	0.5	612.81	258.70

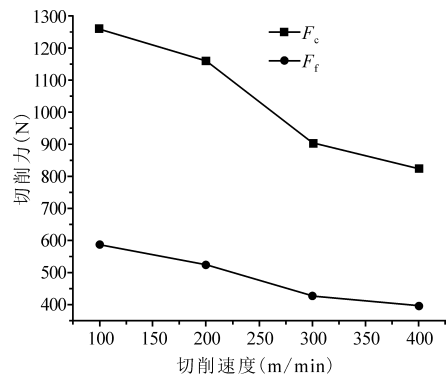
#### (3) 极差结果分析

主切削力  $F_c$  和进给抗力  $F_f$  的极差分析结果见表3,由极差值得到切削参数对  $F_c$  和  $F_f$  影响因素的主次顺序为:切削速度 > 进给量 > 切削深度。在选定的研究参数范围内,主切削力和进给抗力最小的最优方案为 A4B1C1,即  $v_c = 400\text{m/min}, f_a = 0.1\text{mm/r}, a_p = 0.5\text{mm}$ 。

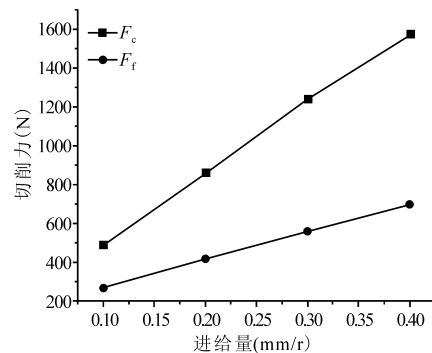
表3 切削力仿真结果极差

切削分力(N)	$k_{im}$	切削参数		
		切削速度 $v_c$	进给量 $f_a$	切削深度 $a_p$
主切削力 $F_c$	$k_{i1}$	1260.17	483.09	414.43
	$k_{i2}$	1160.98	857.38	828.02
	$k_{i3}$	906.94	1239.71	1272.01
	$k_{i4}$	825.49	1573.40	1639.12
	极差	434.68	1090.31	1224.69
	因素主→次	$a_p > f_a > v_c$		
	优方案	A4B1C1		
进给抗力 $F_f$	$k_{i1}$	589.31	266.92	197.29
	$k_{i2}$	526.68	417.36	382.44
	$k_{i3}$	427.08	559.60	570.73
	$k_{i4}$	397.74	696.94	790.37
	极差	191.57	430.02	593.08
	因素主→次	$a_p > f_a > v_c$		
	优方案	A4B1C1		

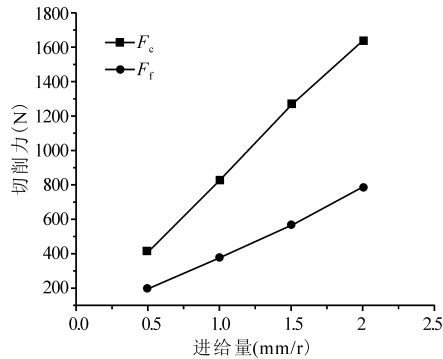
图6为根据表3所绘切削参数对切削力影响的直观分析图。可知,切削力随着切削速度的增大而减小,随着进给量和切削深度的增大而增大。



(a) 切削速度对切削力的影响



(b) 进给量对切削力的影响



(c) 切削深度对切削力的影响

图6 切削参数对切削力的影响规律

## 4 方差分析

### (1) 主切削力 $F_c$ 方差分析

对主切削力进行方差分析计算得到结果见表4。通过查阅  $F$  值分布表可得到其临界值为  $F_{0.05}(3,6) = 4.757$ ,  $F_{0.01}(3,6) = 9.78$ 。

表4 主切削力  $F_c$  方差分析

因素	离差平方和	自由度	均方	$F$ 值	显著性
切削速度 $v_c$	507301.52	3	169100.51	7.24	显著
进给量 $f_a$	2671573.38	3	890524.46	38.12	非常显著
切削深度 $a_p$	3396166.59	3	1132055.53	48.46	非常显著
误差 $e$	140172.20	6	23362.03	—	—

由表可知,切削深度和进给量对主切削力  $F_c$  影响非常显著,切削速度影响显著。切削参数中对主切削力  $F_c$  影响的显著性依次为:切削深度 > 进给量 > 切削速度。

### (2) 进给抗力 $F_f$ 方差分析

对进给抗力进行方差分析计算得到结果见表5。对于进给抗力  $F_f$  来说,切削深度和进给量影响非常显著,切削速度影响显著。切削参数中对进给抗力  $F_f$  影响的显著性依次为:切削深度 > 进给量 > 切削速度。

表5 进给抗力  $F_f$  方差分析

因素	离差平方和	自由度	均方	$F$ 值	显著性
切削速度 $v_c$	94317.56	3	31439.19	5.42	显著
进给量 $f_a$	410480.15	3	136826.70	23.58	非常显著
切削深度 $a_p$	775632.10	3	258544.03	44.56	非常显著
误差 $e$	34812.62	6	5802.10	—	—

### (3) 切削力经验公式

主切削力、进给抗力的车削三要素经验公式为

$$F_c = K_0 a_p^{ax} f_a^{bx} v_c^{cx} \quad (11)$$

$$F_f = K_1 a_p^{ay} f_a^{by} v_c^{cy} \quad (12)$$

式中,  $F_c$  为主切削力;  $F_f$  为进给抗力;  $a_p$  为切削深度;  $f_a$  为进给量;  $v_c$  为切削速度;  $K_0, K_1$  为系数;  $ax, bx, cx, ay, by, cy$  为指数。

对表2中数据进行多元回归分析,可得到式(11)和式(12)的系数和指数,进而得到高强度钢34CrNiMo6的切削力的经验公式为

$$F_c = 3814.9074 a_p^{0.9771} f_a^{0.8280} v_c^{-0.0664} \quad (13)$$

$$F_f = 1509.8229 a_p^{0.9803} f_a^{0.6669} v_c^{-0.0762} \quad (14)$$

对回归分析结果进行检验分析,在回归统计区域中,决定系数  $R^2 = 0.998096$ ,调整后的决定系数  $R^2 = 0.997577$ ,该值越接近于1,表明该多元线性回归方程解释因变量变化的百分比越高,拟合程度越好,表明切削参数中的切削速度、进给量和切削深度对主切削力  $F_c$  有着密切关系。

## 5 结语

(1) 切削参数对主切削力  $F_c$  和进给抗力  $F_f$  影响的关系依次为:切削深度 > 进给量 > 切削速度,且在该研究范围内的切削用量最优组合为  $v_c = 400 \text{ m/min}$ ,  $f_a = 0.1 \text{ mm/r}$ ,  $a_p = 0.5 \text{ mm}$ 。

(2) 由直观分析可知,切削力  $F_c$  和  $F_f$  随着切削速度的增大而减小;随着进给量和切削深度的增大而增大,且主切削力  $F_c$  约为进给抗力  $F_f$  的两倍。

(3) 建立切削力关于切削参数的经验公式。

## 参考文献

- [1] 侯红苗. 热成形工艺对高强度钢性能的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [2] 陈小润, 方沂, 田美丽, 等. 高速铣削 1Cr18Ni9 不锈钢切削力建模及实验分析[J]. 制造技术与机床, 2007(8): 41-44.
- [3] Zhu R, Kapoor S G, Devor R E. Mechanistic force models for chip control tools [J]. Trans ASME: J Manuf Sci and Eng, 1999, 121: 408-416.
- [4] Smithey D W, Kapoor S G, Devor R E. A worn tool force model for three-dimensional cutting operations [J]. Int. J. Mach. Tools and Manuf., 2000, 40(13): 1929-1950.
- [5] 马廉洁, 李琛, 曹小兵, 等. 基于 GA 和 DEFORM 的陶瓷材料切削力数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(12): 1773-1777.
- [6] 李登万. 两种难加工材料的切削试验研究及其工艺参数优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

# 五轴工具磨床通用后置处理研究

张太林<sup>1</sup>, 郑君民<sup>1</sup>, 陈云<sup>2</sup>, 曾莉<sup>2</sup>, 张博<sup>1</sup>, 孙秀元<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大连交通大学; <sup>2</sup>成都工具研究所有限公司

**摘要:** 数控机床后置处理能将刀位轨迹转换为机床数控加工程序,其先进程度对零件加工质量和效率有重要影响。目前五轴工具磨床后置处理大都专机专用或另外购买专用后置处理模块。通过对五轴工具磨床的结构类型分析,建立通用五轴工具磨床运动模型,并采用机床运动创成函数将砂轮的位姿转换为机床各轴的运动量,从而得到五轴工具磨床通用后置处理方法,提高了五轴工具磨床后置处理算法的通用性。

**关键词:** 五轴工具磨床;通用后置处理算法;机床运动创成函数

**中图分类号:** TG714;TH164;TP391 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2020.03.012

## General Post Processing of Five-axis Tool Grinding Machine

Zhang Tailin, Zheng Junmin, Chen Yun, Zeng Li, Zhang Bo, Sun Xiuyuan

**Abstract:** The post-processing of machine tools is to convert the tool path to the CNC machining program. Its advanced nature has an important impact on the quality and efficiency of the part processing. At present, the five-axis tool grinder is processed by a special plane or a special post-processing module purchased by the user. Analysis of the structure type of the five-axis tool grinder, a general five-axis tool grinder motion model is established and by establishing the machine tool creation function, the posture of the grinding wheel is converted into the movement amount of each axis of the machine tool, thus obtaining a kind of universal post processing algorithm for five-axis tool grinding machines. The algorithm improves the versatility of the five-axis tool grinder post-processing algorithm and has positive significance for the five-axis tool grinder processing application.

**Keywords:** five-axis tool grinder; universal post processing algorithm; machine tool motion creation function

## 1 引言

随着复杂整体硬质合金刀具的广泛使用,五轴工具磨床成为加工此类刀具必不可少的工艺装备。其后置处理的核心任务之一是将工件坐标系下砂轮位姿数据转换为机床坐标系下的各轴运动指令<sup>[1]</sup>。然而五轴工具磨床种类繁多,机床结构复杂,空间运动变换关系由具体的机床结构决定,机床结构不同,其运动变换关系也不同,使得空间变换难以实现统一<sup>[2]</sup>,因此构建五轴工具磨床的通用后置处理公式,对同类型不同结构机床的后置处理算法做统一表达具有较大意义。

国内外一些专家学者在五轴数控机床后置处理方面进行了广泛研究。在机床结构方面:Sakamoto<sup>[3]</sup>将五轴机床分成刀具旋转型、工作台旋转型和混合型3种典型结构,文献[4,5]分别对上述3类机床结构进行深入研究;机床运动学方面:Bohez E. L. J.<sup>[6]</sup>把五轴机床的运动学结构分为4类,Tutunea-Fatan O. R.<sup>[7]</sup>设计了3个平动轴和2个旋转轴的通用五轴机床模型,得到了该类型机床的统一变换矩阵;姚斌等<sup>[8]</sup>按照砂轮与工件相对位置变化方式的不同,将五轴工具磨床分为P型和B型,并对刀具成形的几何运动原理作了进一步阐释。以上研究的后置处理程序都是针对特定的机床结构进行,或仅给出通用五轴机床运动模型,针对五轴工具磨床通用后置处理算法缺乏相应的研究。

本文通过对五轴工具磨床的结构及其后置处理

基金项目:“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2018ZX04041001)

收稿日期:2020年1月

[7]张蓉蓉,赵先锋,李长虹,等.基于Deform-3D的铝合金7075车削力模型的研究[J].组合机床与自动化加工技术,2016(6):59-62.

[8]Pierre Vigué, Christophe Vergez, Sami Karkar, et al. Regularized friction and continuation; comparison with coulomb's law[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 389.

[9]Walter 2102 切削加工综合样本[M]. 无锡:Walter, 2012.

第一作者:刘玮,高级实验师,沈阳理工大学装备工程学院,110159 沈阳市

First Author: Liu Wei, Senior Experimentalist, Equipment Engineering College of Shenyang Ligong University, Shenyang, 110159, China