

GH4169 高速铣削参数对表面粗糙度影响研究

Effect of Milling Parameters on Surface Roughness in High Speed Milling GH4169

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 刘维伟 李 锋 姚倡锋 成宏军

[摘要] 采用正交试验法,使用整体硬质合金刀具进行 GH4169 高温合金的高速铣削试验,分析了各切削参数对表面粗糙度的影响规律,建立了表面粗糙度的预测模型,运用方差分析法,检验了模型的显著性。结果表明:每齿进给量对表面粗糙度的影响最大,其次是铣削深度,铣削速度的影响最小。较高的切削速度和较低的进给速度的交互作用对提高表面质量是有利的。

关键词: GH4169 高速铣削 方差分析 表面粗糙度

[ABSTRACT] The orthogonal experiment is processed for the study on the effect of the cutting parameters on the superalloy GH4169 surface roughness by using the carbide tool on the condition of the high speed milling. The theory model between the surface roughness and cutting parameters is established. The variance analysis is applied to check the significances of the surface roughness prediction model. The research results indicate that feed rate have highly obvious influence on surface roughness, followed by cutting depth and cutting speed, the interaction of the high speed and low feed to improve surface quality is favorable.

Keywords: GH4169 High speed milling Variance analysis Surface roughness

高温合金是 20 世纪 40 年代发展起来的一种新型航空金属材料,可在 600~1100℃ 的氧化和燃气腐蚀条件下,承受复杂应力,并能长期可靠地工作。GH4169 属于镍基高温合金,与美国的 Inconel718 相近,工作温度高、组织稳定,具有良好的抗疲劳、抗蠕变、抗氧化、耐腐蚀性能,主要用于制造航空发动机、各类燃气轮机热端部件,如涡轮部分的工作叶片、导向叶片、涡轮盘等。在各类难加工材料中,镍基高温合金是最难加工的材料之一,在切削加工时,加工硬化现象严重、切削力大、切削温度高、刀具磨损严重、塑性变形大、加工表面质量和精度不易保证^[1-3]。

高速切削不仅可以减少切削时间,大幅度提高切削效率,而且有利于提高加工精度和表面质量^[4-7]。德国

的 H.Schulz^[8] 教授于 1992 年提出了不同材料高速切削的速度范围,对于镍基合金的高速切削,切削速度应大于 50m/min。

国内外学者对镍基高温合金 GH4169 的高速切削进行了多方面的研究。土耳其安卡拉大学的 Nalbant^[9] 等研究了陶瓷刀高速车削 Inconel718 过程中,切削速度和刀具几何参数对切削力的影响;英格兰伯明翰大学的 Nga^[10] 等研究了球头刀高速铣削 Inconel718 过程中,刀具与工件的夹角、刀具涂层、切削条件对刀具寿命、刀具磨损、铣削力、切屑形式、切削温度的影响;南京航空航天大学肖茂华^[11] 等研究了陶瓷刀具高速切削镍基高温合金 Inconel718 时刀具的沟槽磨损。但是这些研究都没有对高速切削条件下铣削参数的交互作用对工件表面粗糙度的影响规律进行研究。

本文采用正交试验方法,使用整体硬质合金刀具进行了 GH4169 高温合金的高速铣削试验,对加工后的表面粗糙度进行了研究,建立了表面粗糙度的预测模型,分析了高速铣削条件下单个切削参数及切削参数交互作用对表面粗糙度的影响规律,可为高温合金类零件的精加工高速铣削参数优化、控制铣削表面质量提供依据。

1 GH4169 高温合金高速铣削正交试验

1.1 试验条件

试验机床选用 VMC850 三坐标立式数控铣床,最大转速 8000r/min,最大功率 22kW;试验材料为 GH4169 高温合金,其化学成分如表 1 所示;试件为长方体,几何尺寸为 310mm×45mm×40mm;冷却方式采用乳化液冷却;刀具材料选用硬质合金,牌号为 K44,刀具直径为 20mm,2 刃平底铣刀。

表1 GH4169的化学成分 %

Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al
51.75	17.0	5.11	2.93	1.04	0.41
Si	Cu	C	Mn	B	P
0.21	0.07	0.042	0.03	0.006	0.005

表面粗糙度的测量采用 TR240 表面粗糙度仪,具体测量过程如图 1 所示:在已加工面上共测量 4 个点,然后求平均值。取样长度为 0.8mm,评定长度为 4mm。

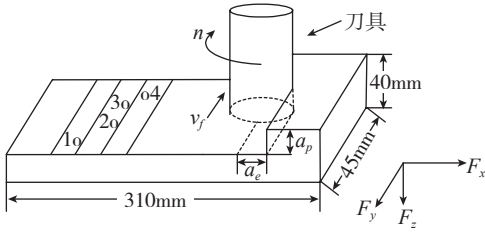


图1 铣削过程
Fig.1 Milling process

1.2 试验方案

采用三因素三水平正交试验的方法进行 GH4169 高温合金高速铣削试验。试验方案及表面粗糙度测试结果如表 2 所示。

表2 正交试验方案及表面粗糙度测试结果

序号	$v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$f_z / (\text{mm} \cdot \text{tooth}^{-1})$	a_p / mm	$R_a / \mu\text{m}$
1	120	0.05	0.30	0.814
2	120	0.06	0.35	1.256
3	120	0.07	0.40	1.517
4	140	0.05	0.35	0.824
5	140	0.06	0.40	1.152
6	140	0.07	0.30	1.204
7	160	0.05	0.40	0.853
8	160	0.06	0.30	0.914
9	160	0.07	0.35	1.243

试验采用统一的切宽 $a_e=6\text{mm}$,每组参数走 6 刀,考虑到后 3 刀有可能会在下一组切削时刮蹭,误差过大,所以测量前 3 刀的粗糙度值。9 组试验均采用顺铣方式,铣削后的试件表面如图 2 所示。



图2 试件表面
Fig.2 Specimen surface

2 试验结果与讨论

2.1 表面粗糙度经验公式的建立

指数型经验公式是目前比较常见的表面粗糙度经验公式形式^[12]。因此,这里建立以切削速度 v_c ,每齿进给量 f_z ,切深 a_p 为变量的表面粗糙度 R_a 经验公式:

$$R_a = C a_p^{a_1} f_z^{a_2} v_c^{a_3} \quad (1)$$

式中, C 取决于被加工材料和切削条件的系数, a_1, a_2, a_3 分别为指数,式(1)两边分别取对数得:

$$\lg R_a = \lg C + a_1 \lg a_p + a_2 \lg f_z + a_3 \lg v_c \quad (2)$$

令 $Y = \lg R_a, a_0 = \lg C, X_1 = \lg a_p, X_2 = \lg f_z, X_3 = \lg v_c$, 则式(2)可化为:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 \quad (3)$$

应用多元线性回归法^[13]进行拟合,对式(3)进行回归分析,求得回归系数,本文利用 MATLAB 软件,得到的回归方程为:

$$Y = 3.153 + 0.595 X_1 + 1.370 X_2 - 0.548 X_3 \quad (4)$$

再反求式(2)中各个系数,即可得出表面粗糙度的经验公式,最终得到表面粗糙度与铣削深度 a_p ,每齿进给量 f_z ,铣削速度 v_c 之间的数学模型为:

$$R_a = 1422.33 a_p^{0.595} f_z^{1.370} v_c^{-0.548} \quad (5)$$

2.2 回归方程显著性检验

对回归方程(4)进行显著性检验,采用 F 值检验法来检验回归方程的显著性, F 值检验法规定:试验因素数为 m ,次数为 n ,给定显著性水平为:0.05。若 $F < F_{0.05}(m, n-m-1)$,则称 Y 与 X_i 间没有明显的线性关系,回归方程不可信;若 $F_{0.05}(m, n-m-1) < F < F_{0.01}(m, n-m-1)$,则称 Y 与 X_i 间有显著的线性关系;若 $F > F_{0.01}(m, n-m-1)$,则称 Y 与 X_i 间有十分显著的线性关系。本文 $m=3, n=9$,查 F 分布表得 $F_{0.05}(3, 5)=5.41, F_{0.01}(3, 5)=12.1$ 。由表 3 可知, Y 的 F 值大于 $F_{0.01}(3, 5)$,回归方程十分显著,与实际情况拟合较好。

表3 回归方程方差分析表

差异源		平方和	自由度	均方	F 值	显著性
Y	回归	0.076	3	0.025	94.817	十分显著
	残差	0.001	5	0.000		
	总和	0.077	8			

2.3 表面粗糙度的极差统计

运用极差分析法可以确定切削用量对表面粗糙度影响的主次关系。根据正交试验的结果,进行极差统计,结果如表 4 所示。极差最大的列,其对应因素对表面粗糙度的影响最大。所以,对于 GH4169 高速铣削表面粗

表4 表面粗糙度的极差统计

因素	v_c	f_z	a_p
水平 1	1.196	0.830	0.977
水平 2	1.060	1.107	1.108
水平 3	1.003	1.321	1.174
极差	0.193	0.491	0.197

糙度,进给量的影响是最主要的因素,其次是切削深度和切削速度。

3 切削参数对表面粗糙度的影响规律

3.1 单个切削参数变化对表面粗糙度的影响规律

根据表 4 做出各切削参数对表面粗糙度的直观分析图。

如图 3 所示,随着切削速度增加,表面粗糙度减小。这是因为切削速度提高,切削力降低,而切削力是切削过程中产生振动的主要激励源,切削速度的提高,使切削系统的工作频率远离机床的低阶固有频率,而工件的加工表面粗糙度对低阶固有频率最敏感,因此提高切削速度可大大降低加工表面粗糙度。另外,随着切削速度增大,切削区温度提高,使金属韧性增加,在切削热的高温作用下,金属边层软化,这就使摩擦系数降低,表面粗糙度也进一步降低^[12-14]。

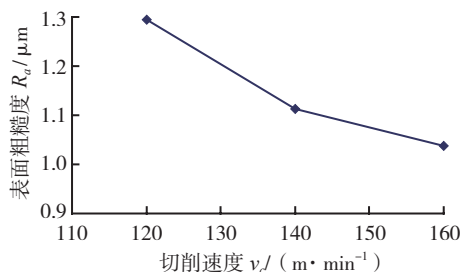


图3 切削速度对表面粗糙度的影响

Fig.3 Effect of cutting speed on surface roughness

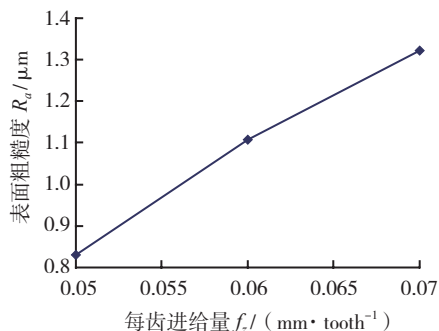


图4 进给量对表面粗糙度的影响

Fig.4 Effect of feed rate on surface roughness

如图 4 所示,随着每齿进给量的增加,表面粗糙度急剧增加。这是因为随着进给量增加,切削厚度增加,表面金属塑性变形的体积增加,大量变形的金属从副刀刃方向排出,表面粗糙度因而迅速上升。

如图 5 所示,随着铣削深度的增大,表面粗糙度值近似成线性增大,原因是随着铣削深度的增大,铣削面积增大,切削力增大,导致试件的表面粗糙度值增大。一般来说,切削深度对加工表面质量的影响主要是由其切削力的影响而引起的,增大切削深度会使切削力随之增大,这样使切屑与前刀面的挤压更严重,反应更强烈,会使切屑很容易粘结在刀具的前刀面上,形成积屑瘤,因而会使表面粗糙度增大。

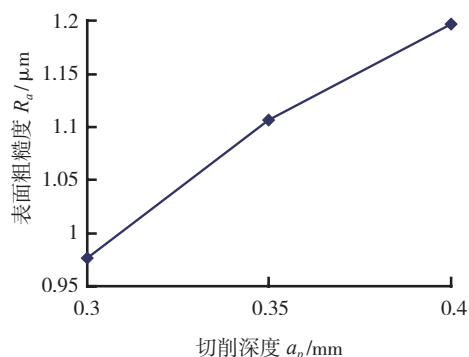


图5 切削深度对表面粗糙度的影响

Fig.5 Effect of cutting depth on surface roughness

3.2 切削参数交互作用对表面粗糙度的影响规律

3.2.1 f_z 与 v_c 的交互影响

从减小粗糙度值、提高表面质量的角度来分析,切削速度和每齿进给量 2 个参数匹配的最优值是有差异的,但最差值的区域基本是相同的,如图 6 所示,在“低切削速度 + 较高进给量”的区域表面粗糙度较大,这是

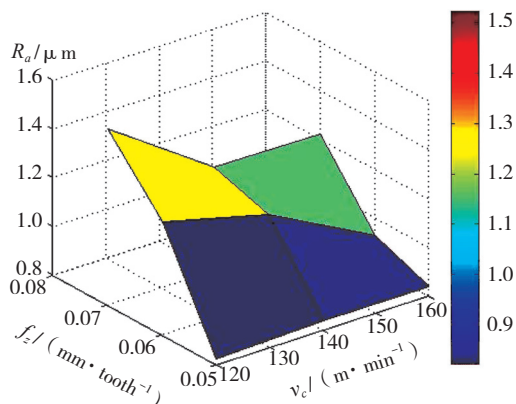


图6 进给量和切削速度对表面粗糙度的交互影响

Fig.6 Reciprocal effect of feed rate and cutting speed on surface roughness

因为进给速度增大,工件表层易产生“撕裂”^[14-17]现象,表面粗糙度增大。

3.2.2 v_c 与 a_p 的交互影响

从图7可以看出,切削速度与切削深度2参数匹配的最佳值为“较高切削速度 + a_p (0.3mm~0.35mm)” ;当切削速度较低、 a_p 较大时,粗糙度值最大,表面质量最差。当切削速度较高、 a_p 较小时,粗糙度值也比较大,这是因为切深过小,刀具对工件的挤压增大,塑性变形增加,容易使工件已加工表面产生隆起、侧流及犁沟等,表面质量降低。

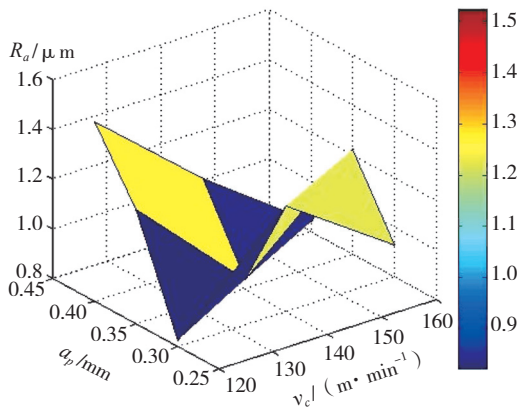


图7 切削深度和切削速度对表面粗糙度的交互影响
Fig.7 Reciprocal effect of cutting depth and cutting speed on surface roughness

3.2.3 a_p 与 f_z 的交互影响

如图8所示,切削深度和每齿进给量这2个参数匹配的最优值和最差值的区域基本是相同的,在“低切深 + 低进给量”的区域表面粗糙度较小,在“大切深 + 大进给量”的区域表面粗糙度较大。另外,这也符合以上的2个结论。

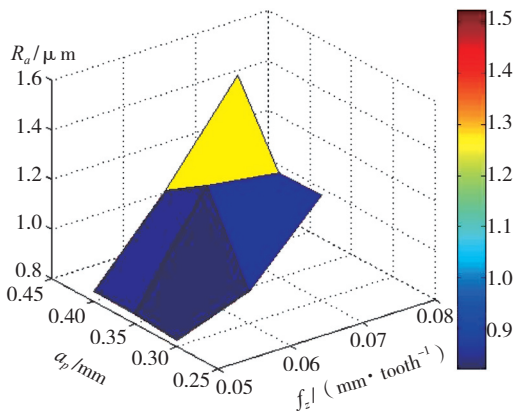


图8 切削深度和进给量对表面粗糙度的交互影响
Fig.8 Reciprocal effect of cutting depth and feed rate on surface roughness

总之,在进行高速精铣时,选取高切削速度、低进给量对提高表面质量是有利的,但同时也要综合考虑刀具磨损、刀具寿命。切削速度高,表面粗糙度值小,刀具磨损快;切削速度一定,进给速度高,表面粗糙度值大,刀具容易崩刃,但切削效率高;而进给速度较低,粗糙度值小,但刀具磨损加剧。

3 结论

通过对GH4169高温合金高速铣削表面粗糙度的试验研究,可以得出如下结论。

(1) 提高切削速度能有效地改善工件表面粗糙度。切削速度增大,粗糙度值减小;而轴向切深、进给速度增大,粗糙度值增大,但增大的幅度不同,表明影响程度也各不相同。

(2) 通过正交试验的结果以及多元线性回归法建立的预测模型的指数可以看出,对于GH4169高温合金的精加工高速铣削,每齿进给量对表面粗糙度的影响十分显著,其次是铣削深度,铣削速度的影响最小。

(3) 通过切削参数交互作用对表面粗糙度的影响规律可以看出,高转速、低进给速度对提高表面质量是有利的。

参考文献

- [1] Rahman M, Seah W K H, Teo T T. The machinability of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 63: 199-204.
- [2] Dudzinski D, Devillez A, Moufki A, et al. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44: 439-456.
- [3] Ezugwu E O, Wang Z M, Machado A R. The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 86: 1-16.
- [4] 艾兴. 高速切削加工技术. 北京: 国防工业出版社, 2003: 9-67.
- [5] 王殿龙, 苟志峰, 庞继有, 等. K24 镍基高温合金切削性能试验研究. *中国机械工程*, 2002, 38 (增刊): 190-193.
- [6] Liu Weiwei, Zhu Lijian, Shan Chenwei, et al. Effect of cutting parameters on the cutting force in the end milling of GH4169 superalloy. *The international conference on E-product. E-service and E-entertainment*, 2010(6): 3756-3759.
- [7] 刘维伟, 张拉拉, 单晨伟, 等. GH4169 高温合金铣削力实验研究. *机械设计与制造*, 2011, (1) 1: 176-178.
- [8] Schulz H, Moriwaki T. High-speed machining. *Annals of the CIRP*, 1992, 41(2): 637-643.
- [9] Muammer N, Abdullah A, Hasan, et al. The effect of cutting speed and cutting tool geometry on machinability properties of Inconel718. *Materials and Design*, 2007, 28: 1334-1338.
- [10] Nga E G, Leeb D W, Sharmana A R C, et al. High speed ball nose end milling of Inconel 718. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*,

(下转第 93 页)



图3 软件界面
Fig.3 Interface of software

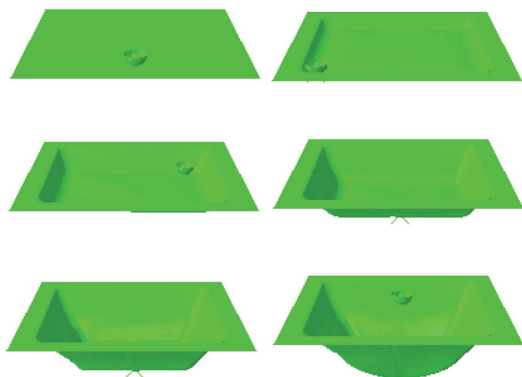


图4 模拟过程图
Fig.4 Process of simulation result

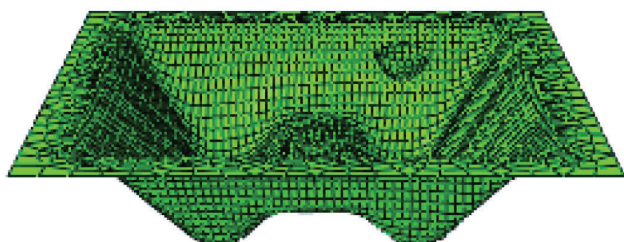


图5 带有复连通区域的零件成形过程模拟
Fig.5 Simulation of part formed by incremental forming with multiply-connected cross-sections

截面为一复连通区域,在成形时需要通过抬刀分别对两个区域进行加工,使用文献[6]中提出的虚拟靠模导向法不易实现其成形过程的模拟。由于本方法从数控代码中直接获取刀路信息,可以很容易地将实际成形时的工具头运动轨迹在有限元软件中实现。

与以往使用的方法相比,该方法大大简化了刀路载入和有限元建模的难度,并可以实现更加复杂的刀路控制,简单有效地控制了成形工具头的运动。

4 结论

基于数控编程的金属板料渐进成形复杂刀路构建方法可以非常简单方便地实现对复杂运动轨迹的控制。该方法的数据来源为CAM软件中生成的数控代码,理论上可以实现对任何形状零件渐进成形过程与任何复杂运动形式的数值模拟。由于该方法的控制对象为成形工具头的参考点,无需建立虚拟靠模等辅助模型,大大简化了有限元模型的复杂程度,减少了不必要的网格划分,降低了计算成本。该方法已经在有限元分析软件ABAQUS上进行了实现,其实用性得到了充分的证明。

参考文献

- [1] 莫健华,韩飞. 金属板材数字化渐进成形技术研究现状. 中国机械工程,2008,19(4): 491-497.
- [2] Dufloy J R, Lauwer B, Verbert J. Study on the achievable accuracy in single point incremental forming. *Advanced Methods in Material Forming*, 2007, 251-262.
- [3] Jeswiet J, Micari F, Hirt G, et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *Annals of the CIRP*, 2005, 54(2): 623-650.
- [4] Yamashita M, Gotoh M, Atsumi S Y. Numerical simulation of incremental forming of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 199: 163-172.
- [5] Dejardin S, Thibaud S, Gelin J C. Experimental and numerical investigations in single point incremental sheet forming. *Materials Processing and Design*, 2007, 908: 889-894.
- [6] 李泷泉,高霖,韦红余. 金属板料渐进成形有限元仿真过程中复杂成形路径的构建方法. *机械工程学报*,2006,42(6):227-230.
- [7] 王勛成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法. 北京:清华大学出版社,1997.

(责编 深蓝)

(上接第90页)

2000, 49(1): 41-46.

- [11] 肖茂华,何宁,李亮,等. 陶瓷刀具高速切削镍基高温合金沟槽磨损试验研究. *中国机械工程*,2008,(10)19: 1188-1192.
- [12] 王素玉,赵军,艾兴,等. 高速切削表面粗糙度理论研究综述. *机械工程师*,2004,(10): 3-6.
- [13] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理. 北京:化学工业出版社,2005.
- [14] 王素玉. 高速铣削加工表面质量的研究[D]. 济南:山东大学,2006.
- [15] Liu Weiwei, Gao Xiaojuan, Shan Chenwei, et al. Influence of cutter geometric parameters on the stability of milling process of thin-walled blades. 2010 2nd international conference on intellectual technology in industrial practice, 2010(1): 119-121.
- [16] 任军学,罗远锋,姚倡锋. TC17 钛合金高速铣削表面粗糙度及参数灵敏度研究. *航空制造技术*,2009,22:78-82.
- [17] 杜随更,吕超,任军学,等. 钛合金高速铣削表面形貌及表层组织研究. *航空学报*,2008,29(6):1710-1715.

(责编 亦非)