

镍基高温合金 GH4169 车削过程刀具磨损特性研究*

岳彩旭, 姜 男, 黄 翠

(哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 哈尔滨 150080)

[摘要] 刀具磨损过快是镍基高温合金 GH4169 在切削过程中一直存在的难题, 因而刀具磨损特性的研究对工艺优化具有重要意义。通过 Deform 软件建立了具有槽型特征刀具的仿真模型, 揭示了后刀面磨损量对切削过程的影响, 并通过车削试验验证了仿真模型的准确性, 获得了不同后刀面磨损量对切削力及切削温度的影响规律, 同时也获得了该切削过程刀具的磨钝标准, 对镍基高温合金精加工过程中的工艺优化具有较好的理论指导意义。

关键词: 镍基高温合金; 车削; 刀具磨损; 有限元仿真; 切削温度; 切削力

Research on Tool Wear Characteristics of Ni-Based Superalloy GH4169 During Turning

YUE Caixu, JIANG Nan, HUANG Cui

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

[ABSTRACT] Too fast tool wear is a difficult problem in the cutting process of Ni-based superalloy GH4169, so it is of great significance to study the tool wear characteristics. The simulation model of groove characteristic tool is established by DEFORM software. The influence of the wear on the cutting process is revealed. The accuracy of the simulation model is verified by turning experiment, and the influence of different flank wear on cutting force and cutting temperature is obtained. At the same time, the blunt standard of cemented carbide cutting tools is also obtained. The analysis results have good guiding significance for process optimization during finishing process of Ni-based superalloy.

Keywords: Ni-based superalloy; Turning; Tool wear; Finite element simulation; Cutting temperature; Cutting force

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.19.074

镍基高温合金具有高温强度高、抗氧化性好、耐热性和耐腐蚀性强等特性, 已经被广泛应用于航空航天领域, 其主要应用于制造航空发动机的涡轮叶片、涡轮盘和凸轮轴等零部件^[1-2]。但是, 镍基高温合金材料因其导热系数低、塑性变形大等加工特性, 常会导致切削力大、切削温度高、刀具磨损严重和切屑不易折断等现象, 很大程度上导致刀具寿命、工件表面质量及生产效率的降低^[3-4]。因此, 研究镍基高温合金切削过程中的刀具磨损特性对航空发动机零部件的生产加工具有重要意义。

近年来, 国内外许多研究人员对镍基高温合金切削过程和刀具磨损特性等问题进行了研究。肖茂华等^[5]对镍基高温合金高速铣削过程切削热进行了研究, 通过 DEFORM 软件模拟了铣削过程, 仿真结果表明随着切削速度的增加, 切屑所带走的热量比例增加。Settineri 等^[6]使用 3 种不同涂层刀具进行切削试验, 根据 3 种

不同涂层刀具表面磨损形貌得出了最优涂层材料。宋新玉等^[7]研究了镍基高温合金切削过程中的刀具磨损特性, 通过切削试验研究表明刀具的主要磨损形式为刀具涂层剥落, 并得到了不同条件下的刀具寿命。周俊^[8]通过切削试验构建了更加接近实际的镍基高温合金 GH4169 材料本构关系模型, 提高了有限元仿真精度及效率, 并得到了切屑卷曲过程中的应力分布规律。Sugihara 等^[9]研究了镍基高温合金 Inconel718 切削过程中的刀具磨损机理, 并预测了不同刀具表面磨损形貌下的切削性能。Shao 等^[10]通过对有限元磨损模型引入子程序的方法, 对钛合金切削过程中的刀具磨损进行了预测。Umbrello 和 Attanasio 等^[11-12]将磨料磨损子程序引入刀具磨损模型中, 对切削过程中的刀具磨损进行了预测, 并通过试验验证了仿真模型的准确性。

随着计算机辅助技术的快速发展, 使有限元仿真技术在金属切削领域中广泛应用, 通过有限元仿真技术不仅能降低试验成本, 缩短试验周期, 揭示出实际切削过

* 基金项目: 国家自然科学基金(51575147); 哈尔滨理工大学青年拔尖人才支持计划(201507)。

程的本质,还能对实际切削加工过程中可能出现的问题进行预测,故有限元仿真技术的应用对实际生产加工具有较好的指导意义。本文采用 Deform 软件建立了具有槽型特征刀具的仿真模型,对不同后刀面磨损量下的切削力及切削温度变化规律进行了分析,并通过 GH4169 车削试验验证了仿真模型的准确性。

1 建立车削有限元仿真模型

1.1 建立工件及刀具几何模型

运用软件建立刀具及工件几何模型,刀具采用三菱公司生产带有断屑槽的 CNMG120408-MJ 刀片。为了对不同磨损量下的刀具进行仿真,建立了不同后刀面磨损量的刀尖几何模型,后刀面磨损量 VB 分别为 0、0.1mm、0.2mm、0.3mm,如图 1 所示。

为了保证仿真与实际工况更接近、仿真效率更高,工件模型建立如图 2 所示的带有预切部分的三维模型。

1.2 刀具和工件的材料设置及网格划分

在本文的有限元仿真模型中,刀尖部分与工件部分

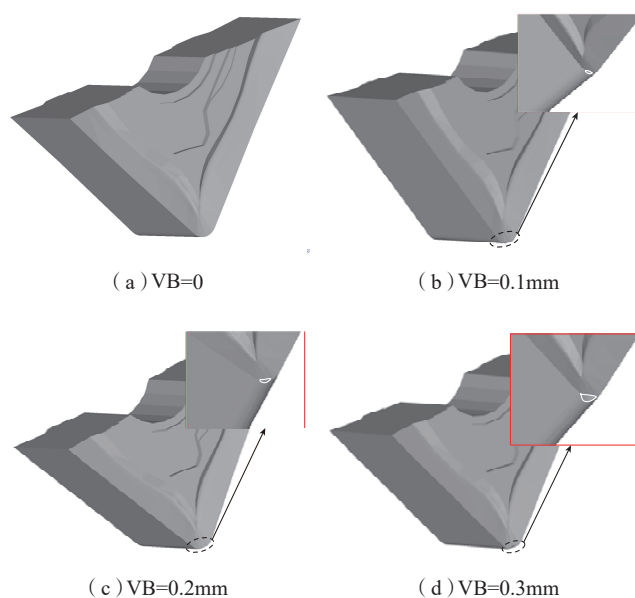


图1 不同后刀面磨损量的刀尖几何模型

Fig.1 Geometric model of tool tip with different flank wear

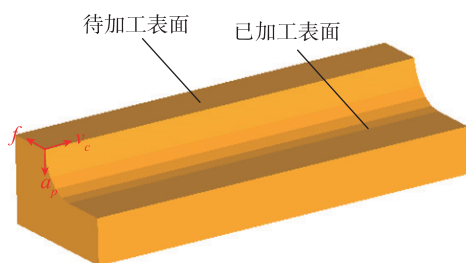


图2 工件几何模型

Fig.2 Geometric model of workpiece

分别设置为刚体与塑性体。刀具材料为硬质合金,涂层材料为 TiAlN,涂层厚度为 5 μ m。工件材料为镍基高温合金 GH4169,其本构关系模型选为 Johnson-Cook 模型,方程式如下^[13]:

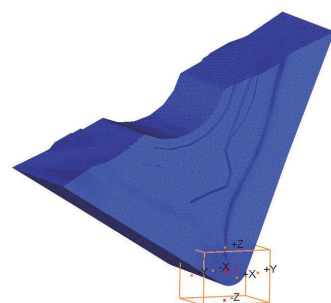
$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m \right] \quad (1)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 是材料的流动应力; $\bar{\epsilon}$ 和 $\bar{\epsilon}_0$ 分别是材料的应变率和参考应变率; T 是加工材料的动态温度; T_0 是参考温度(通常为 20 $^{\circ}$ C); T_m 是材料的熔点温度($T_m=1320^{\circ}$ C); A 是材料屈服应力强度($A=450$ MPa)、 B 是硬化模量($B=1700$)、 C 是应变速率强化项系数($C=0.017$)、 m 是表征材料热软化系数($m=1.3$)和 n 是应变硬化系数($n=0.65$)^[8]。

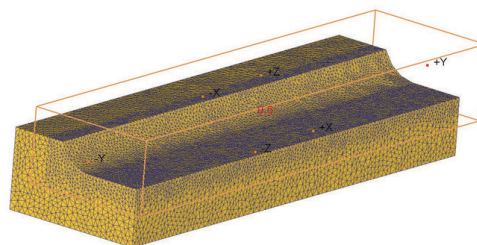
运用有限元仿真软件进行切削仿真时,工件会在切削加工过程中产生塑性变形,网格划分的好坏是仿真模型成功与否的关键,若网格的划分不合理,常会出现网格畸变现象,影响模型塑性变形的迭代收敛性,导致仿真结果的准确性降低,甚至会使仿真无法进行。考虑了仿真精度及效率等综合因素,本文的网格划分方法使用相对网格划分,并对工件和刀尖部分进行了局部划分,工件网格局部划分比率为 0.5,刀尖网格局部划分比率为 0.1,如图 3 所示。

1.3 摩擦模型及分离准则

在金属切削加工过程中,刀具与工件之间的摩擦不仅规律复杂且不可避免。软件 DEFORM 中提供的摩擦模型有以下 3 种:剪切摩擦模型、混合摩擦模型和库伦



(a) 刀尖网格



(b) 工件网格

图3 网格的划分

Fig.3 Grid division

摩擦模型。目前,应用较为成熟且适用于模具接触的摩擦类型为剪切摩擦模型,故本文有限元模型的摩擦类型选用为剪切摩擦模型。剪切摩擦模型方程式:

$$\tau_f = uk \quad (2)$$

式中, τ_f 是摩擦力; k 是剪切屈服极限 ($k = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$); u 是摩擦系数 ($0 \leq u \leq 1$)。

分离准则的选择将直接关系到仿真模型能否更加真实地反映工件材料的物理性能和力学性能。本文选用模型 Cockroft-Latham 来制定切屑分离准则,并将临界值 D 设置为 500。模型 Cockroft-Latham 表达式如下:

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* d\bar{\epsilon} = D \quad (3)$$

式中, σ^* 为最大主应力; $\bar{\epsilon}$ 为等效应变; D 为材料的单元失效值。

2 有限元仿真结果分析

2.1 刀具磨损对切削力的影响

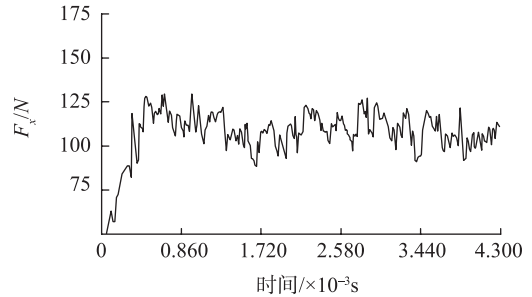
选取不同后刀面磨损量 VB (0、0.1mm、0.2mm 和 0.3mm) 的刀具模型,分别以切削速度 40m/min、进给量 0.1mm/r 和背吃刀量 0.5mm 的切削参数模拟 GH4169 切削过程。图 4 所示为 VB=0 时 X、Y 和 Z 方向切削力的仿真结果,从仿真结果中可以明显看出,刚步入切削过程时, X、Y 和 Z 方向的切削力都呈急剧增长趋势,过了 4.30×10^{-3} s 后,3 个方向的平均力均趋于稳定。仿真过程中 X 方向切削力为进给方向的分力, Y 方向切削力为切削速度方向的分力,其数值最大, Z 方向切削力为切深方向的分力。

图 5 所示为不同后刀面磨损量下 X、Y 和 Z 方向切削力曲线图。随着后刀面磨损量的增加,切削过程中的挤压力和摩擦力不断增大,导致切削力也不断增加。后刀面磨损量 VB 从 0.1mm 到 0.2mm, X、Z 方向的切削力增幅不是很大, Y 方向切削力有明显增幅,这主要是由于后刀面磨损量在 0~0.2mm 之间时,刀具处于正常磨损阶段,故 X、Z 方向的切削力增幅不是很大,而 Y 方向切削力为主切削力,故数值增幅明显;当 VB 超过 0.2mm 时, X、Y 和 Z 方向的切削力增长趋势都很显著,这主要是由于刀具磨损量增加到一定程度时,刀具达到了急剧磨损阶段,切削力急剧增高,刀具磨损速度加快;当 VB=0.3mm 时,其 Y 方向切削力相对于未磨损刀具增加了 4 倍左右, X、Z 方向的切削力相对于未磨损刀具增加了 2 倍左右。

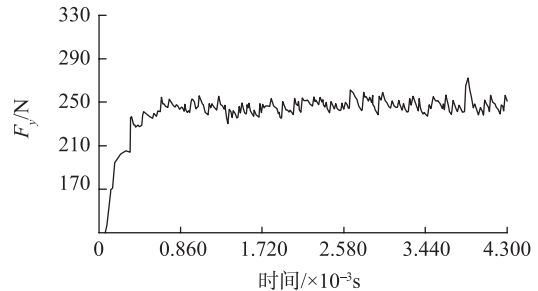
2.2 刀具磨损对切削温度的影响

图 6 所示为不同后刀面磨损量下的切削温度仿真

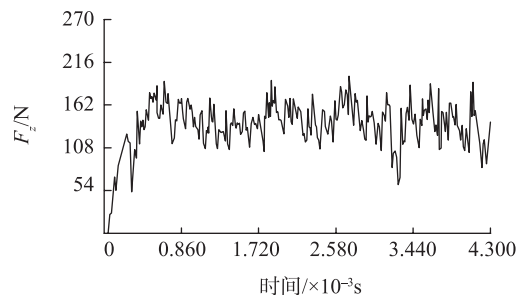
结果,从仿真结果中明显看出,当后刀面磨损量从 0 增加到 0.2mm 时,最高切削温度升高了 258℃,这主要是由于随着后刀面磨损量的增加,切削刃变钝,摩擦力增加,热量增加,故刀具与工件接触区的最高切削温度增加。当 VB 到达 0.3mm 时,刀具与工件接触区的最高切削温度为 681℃,产生该现象的原因是由于刀尖处的磨损量过大导致切削过程中切深减小和接触面积增



(a) X方向切削力



(b) Y方向切削力



(c) Z方向切削力

图4 切削力仿真结果

Fig.4 Results of cutting force simulation

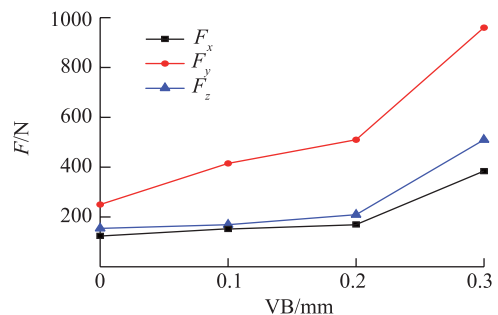


图5 后刀面磨损量对3个方向切削力的影响

Fig.5 Influence of flank wear on cutting force in three directions

加,进而导致刀具与工件接触产生的热量变小、散热面积增加。

3 镍基高温合金车削试验验证

3.1 试验设备及装置

为了验证本文有限元仿真模型的准确性,进行了车削试验,图7为试验现场布局图。试验所用机床为数控车床CKA6150,工件材料采用镍基高温合金GH4169;刀具采用三菱公司生产带有断屑槽的CNMG120408-MJ刀片;切削力的测量采用KISTLER的压电式测力仪,压电式测力仪输出的电荷信号经过配套的电荷放大器放大,再经过数采箱实现数据采集;后刀面磨损量的测量采用日本Keyence公司生产的VHX-1000超景深显微镜。

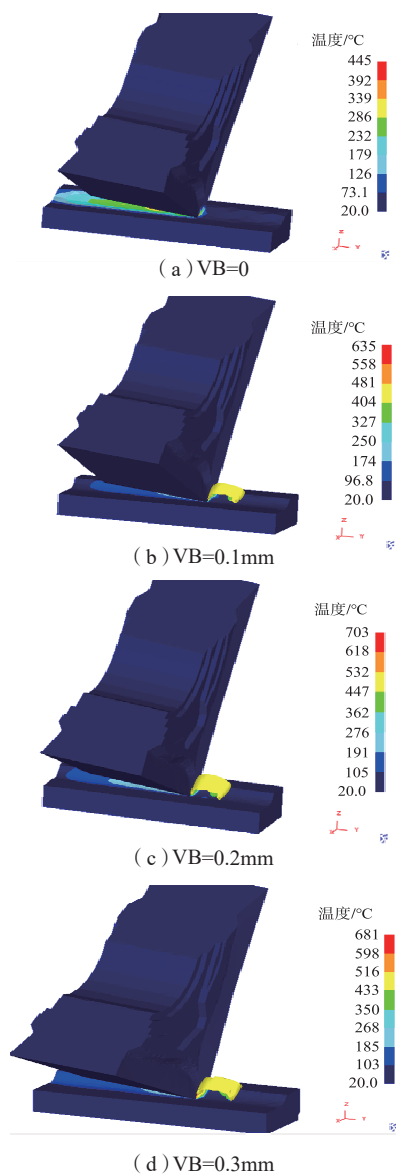


图6 切削温度仿真结果

Fig.6 Results of cutting temperature simulation

试验过程中,每次均选用一个未磨损的刀片在切削速度40m/min、进给量0.1mm/r和背吃刀量0.5mm的切削参数下分别按13组时间进行车削试验(13组切削时间是0.5~12.5min内以0.5min为时间间隔进行选取的)。试验结束后,通过超景深分别对13组刀具进行测量。

如图8所示,选择后刀面磨损量约为0.1mm、0.2mm、0.3mm的4把刀片,切削时间分别为0.25min、5min、9min。从已磨损的刀具上可以看出,在磨损区域的刀具呈亮白色,这主要是由于刀具与工件之间摩擦造成的涂层脱落。

3.2 结果分析与讨论

选取不同后刀面磨损量的4个刀片,分别以切削速度40m/min、进给量0.1mm/r和背吃刀量0.5mm的切削参数下进行切削试验。本文以切削力平均值进行研究分析,其刀具后刀面磨损加剧,X方向进给力、Y方向主切削力和Z方向切深抗力均有不同程度的增加。当VB=0.1mm时,X方向的切削力较未磨损刀具增幅25.3%、Z方向的切削力较未磨损刀具增幅15.3%,Y方

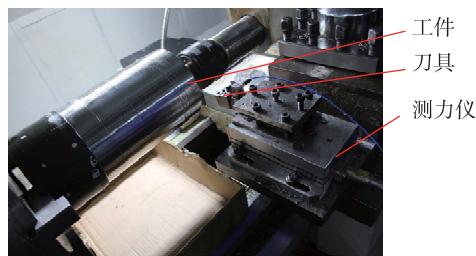


图7 试验现场布局图

Fig.7 Layout of the test site

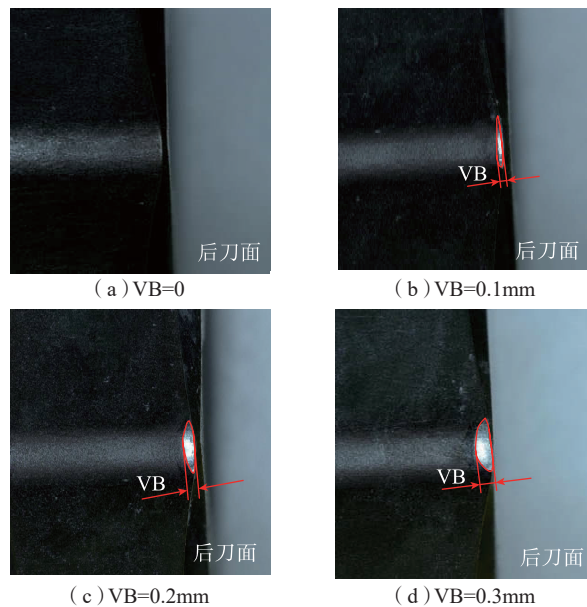


图8 不同磨损程度的刀具

Fig.8 Cutting tool with different flank wear

向切削力增幅最为显著,较未磨损刀具增幅 38.5%;当 VB=0.2mm 时, X 方向的切削力较 VB=0.1mm 时增幅 21.7%、Z 方向的切削力较 VB=0.1mm 时增幅 29.4%, Y 方向切削力较 VB=0.1mm 时增幅 45.9%;当 VB=0.3mm 时, X 方向的切削力较 VB=0.2mm 时增幅 139%、Z 方向的切削力较 VB=0.2mm 时增幅 147.3%, Y 方向切削力较 VB=0.2mm 时增幅 156.9%,相对于未磨损刀具增加了 4 倍多。这主要是由于后刀面磨损量在 0~0.2mm 之间时,刀具处于正常磨损阶段,故 X、Y 和 Z 方向的切削力增幅不是很大,当 VB 超过 0.2mm 时, X、Y 和 Z 方向的切削力增长趋势都很显著,这主要是由于刀具磨损量增加到一定程度时,刀具达到了急剧磨损阶段,切削力急剧增高,刀具磨损速度加快。

图 9 为不同后刀面磨损量下切削力的试验与仿真对比图,其中刀具后刀面磨损量 VB=0 时, X、Y 和 Z 方向的仿真切削力误差范围在 6%~8% 之间,精度较

高;当后刀面磨损量 VB=0.1mm 时, X、Y 和 Z 方向的仿真切削力误差范围在 10%~13% 之间,精度较好;当后刀面磨损量 VB=0.2mm 时, X、Y 和 Z 方向的仿真切削力误差范围在 6%~20% 之间,精度一般;当后刀面磨损量 VB=0.3mm 时, X、Y 和 Z 方向的仿真切削力误差范围在 15%~25.6% 之间,误差达到最大。随着后刀面磨损量的增加,误差随着增大,其原因一是可以归结于有限元模型建立时相应边界条件的简化;二是由于 GH4169 材料的本构关系模型是通过试验数据拟合而来,具有一定偏差,导致仿真结果与试验数值产生了一定误差。虽然仿真值与试验值有一定误差,然而从整体趋势上看,仿真与试验较为一致。所以建立的有限元仿真模型是符合实际的,对实际加工具有一定的指导意义。仿真与试验结果均表明后刀面磨损量超过 0.2mm 时的切削力明显增大,刀具处于急剧磨损阶段,因此在镍基高温合金 GH4169 车削精加工过程中,硬质合金刀具最优加工时间应选择在后刀面磨损量达到 0.2mm 之前。

4 结论

本文利用有限元技术和试验相结合的方法,对镍基高温合金 GH4169 的切削过程进行了研究,分析了不同后刀面磨损量下的切削力及切削温度变化规律,得到了如下结论:

(1) 随着后刀面磨损量的增加,切削力及切削温度逐渐增加。当 $VB > 0.2\text{mm}$ 时,切削力急剧增长,刀具达到了急剧磨损阶段。

(2) 镍基高温合金 GH4169 车削精加工过程中,硬质合金刀具的磨钝标准 VB 建议为 0.2mm。

参考文献

- [1] 彭锐涛,廖妙,谭援强,等. 预应力切削镍基高温合金的试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 186-191.
PENG Ruitao, LIAO Miao, TAN Yuanqiang, et al. Experimental study on prestressed cutting nickel base superalloy[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 186-191.
- [2] 张春燕,任和,任家隆,等. 基于 DEFORM-3D 的镍基合金钢的切削性能仿真研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2011, 25(4): 350-353.
ZHANG Chunyan, REN He, REN Jialong, et al. Simulation study on cutting performance of Ni-based alloy steel based on DEFORM-3D[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science), 2011, 25(4): 350-353.
- [3] 王会阳,安云岐,李承宇,等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(S2): 482-486.

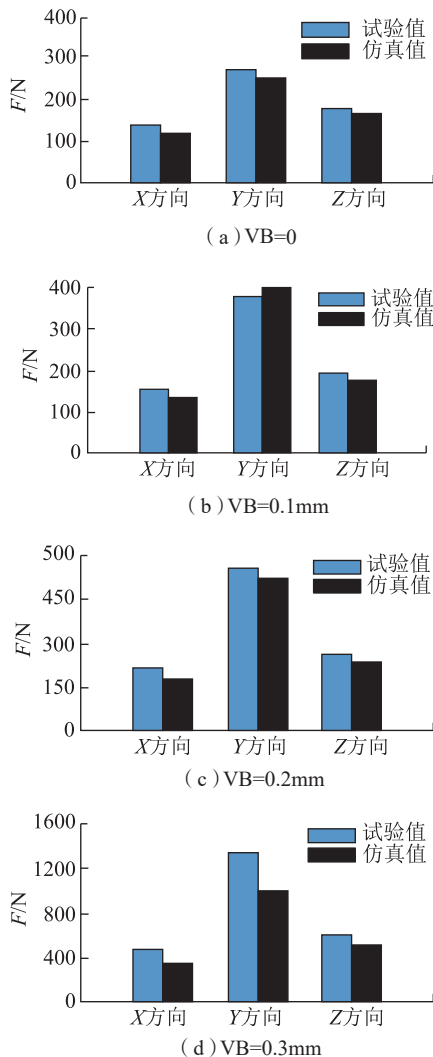


图9 切削力的仿真与试验对比

Fig.9 Comparison between simulation and test of cutting force

(下转第83页)

参考文献

- [1] 梅中文, 黄超, 范玉青. 飞机数字化装配技术发展及展望[J]. 航空制造技术, 2015, 58(18): 31-37.
- MEI Zhongyi, HUANG Chao, FAN Yuqing. Development and prospect of the aircraft digital assembly technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(18): 31-37.
- [2] 初桂兰. 国内飞机数字化装配技术现状研究[J]. 西安航空学院学报, 2016(1): 40-43.
- CHU Guilian. Research on the status quo of aircraft digital assembly technology in China[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2016(1): 40-43.
- [3] 许国康. 大型飞机自动化装配技术[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 734-740.
- XU Guokang. Automatic assembly technology for large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 734-740.
- [4] 范平, 范玉青. 突破技术趋同波音再现竞争优势——对大型飞机研制技术的战略性分析[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 707-712.
- FAN Ping, FAN Yuqing. Breaking through the common technical trend, boeing shows the competition superiority once again—strategic analysis for development technology of large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 707-712.
- [5] 宋彰桓, 赵罡, 孙占磊, 等. 基于 iGPS 的飞机部件对接测量点选取方法研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(5): 57-61.
- SONG Zhanghuan, ZHAO Gang, SUN Zhanlei, et al. Research on iGPS measurement point selection method in fuselage docking[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(5): 57-61.
- [6] 熊瑞斌, 黄浦缙, 柯映林. 一种适用于飞机装配的新型随动定位器[J]. 航空学报, 2009, 30(12): 2469-2475.
- XIONG Ruibin, HUANG Pujin, KE Yinglin. A new posture following and keeping fixture for aircraft assembly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(12): 2469-2475.
- [7] 关月, 赵宝, 李大伟, 等. 飞机部件自动对接的位姿标定计算及软件系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2017(1): 146-149.
- GUAN Yue, ZHAO Bao, LI Dawei, et al. Calibration and position and orientation computation in automatic aircraft component butt and its software system design[J]. Mechanical Manufacturing and Automation, 2017(1): 146-149.
- [8] 罗芳, 邹方, 周万勇. 飞机大部件对接中的位姿计算方法[J]. 航空制造技术, 2011, 54(3): 91-94.
- LUO Fang, ZOU Fang, ZHOU Wanyong. Posture calculating algorithm in large aircraft component butt[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(3): 91-94.
- [9] 颜世俊, 李东升, 王亮. 飞机大部件自动化对接集成系统关键技术研究[J]. 机械工程与自动化, 2011(3): 146-148.
- YAN Shijun, LI Dongsheng, WANG Liang. Key technologies of automated integrated system in aircraft final assembly[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2011(3): 146-148.
- [10] 郭洪杰. 飞机大部件自动对接装配技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(13): 72-75.
- GUO Hongjie. Automated joint assembly technology for large structure of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(13): 72-75.

通讯作者: 张辉, 博士、高级工程师, 研究方向为装配与连接技术, E-mail: sac_zhh@163.com。

(责编 铃兰)

(上接第78页)

WANG Huiyang, AN Yunqi, LI Chengyu, et al. Research progress of nickel-based superalloy materials[J]. Materials Review, 2011, 25(S2): 482-486.

[4] DUDZINSKI D, DEVILLEZ A, MOUFKI A, et al. A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel718 alloy[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(4): 439-456.

[5] 肖茂华, 何宁, 李亮, 等. 镍基高温合金高速铣削的切削热研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(11): 105-109.

XIAO Maohua, HE Ning, LI Liang, et al. Study on cutting heat of high-speed milling of nickel-based high-temperature alloy[J]. Journal of Harbin University of Technology, 2011, 43(11): 105-109.

[6] SETTINERI L, FAGA M G, LERGA B. Properties and performances of innovative coated tools for turning inconel[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(7-8): 815-823.

[7] 宋新玉, 赵军. 加工 In718 时硬质合金涂层刀具的磨损机理[J]. 工具技术, 2008, 42(7): 10-12.

SONG Xinyu, ZHAO Jun. Wear mechanism of cemented carbide coated cutting tools during In718 machining[J]. Tool Technology, 2008, 42(7): 10-12.

[8] 周俊. 镍基高温合金 GH4169 高速切削相关技术与机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

ZHOU Jun. Study on the related technology and mechanism of high speed machining for nickel based superalloy GH4169[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[9] SUGIHARA T, ENOMOTO T. High speed machining of Inconel 718 focusing on tool surface topography of CBN tool[J]. Procedia Manufacturing, 2015(1): 675-682.

[10] SHAO F, LIU Z Q, WAN Y, et al. Finite element simulation of machining of Ti-6Al-4V alloy with thermodynamical constitutive equation[J]. Advanced Materials Research, 2010, 49(5-8): 431-439.

[11] UMBRELLO D, FILICE L, MICARI F, et al. Prediction of tool wear progress in machining of carbon steel using different tool wear mechanisms[J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1(1): 571-574.

[12] ATTANASIO A, UMBRELLO D. Abrasive and diffusive tool wear FEM simulation[J]. International Journal of Material Forming, 2009, 2(1): 543-546.

[13] 黄翠. 基于有限元方法的 GH4169 车削过程刀具磨损仿真及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.

HUANG Cui. Simulation and experimental study of tool wear in GH4169 turning process based on finite element method[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.

通讯作者: 岳彩旭, 博士、副教授, 研究方向为硬态加工技术和切削过程的有限元仿真技术, E-mail: yuecaixu@hrbust.edu.cn。

(责编 铃兰)