doi：10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.03.003

转速时变性对铝合金铣削加工影响分析*

何东星[1]，赵金月[2]，张振杰[1]，钟晨帆[1]

（1.辽宁科技大学 机械工程与自动化学院，辽宁 鞍山　114051；2.辽宁科技大学 创新创业学院，辽宁 鞍山　114051）

摘　要：铝合金零件通常采用铣削加工，铣削参数对产品质量存在重要影响，为分析刀具时变性对铝合金铣削加工的影响，建立了刀具转速时变性模型，并采用 MATLAB 编程构建了时变刀具转速，然后将所构建的时变转速引入三维铝合金铣削有限元模型中，得到了考虑刀具时变性的铝合金铣削三维模型，分析了刀具转速时变性对铝合金铣削的影响。结果发现：刀具转速时变性会导致刀具所受阻力矩和工件产生的最大铣削应力产生较大的动态变化，因此在实际加工过程中应当尽量保证刀具转速的稳定性。

关键词：铝合金；铣削；转速时变性；有限元

中图分类号：TG506.1　　文献标识码：A　　文章编号：1007-4414(2024)03-0008-04

Analysis of the Influence of Time-Varying Rotational Speed on Aluminum Alloy Milling

HE Dong-xing[1], ZHAO Jin-yue[2], ZHANG Zhen-jie[1], ZHONG Chen-fan[1]

(*1.School of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051, Liaoning, China; 2.Institute of Innovation and Entrepreneurship, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051, Liaoning, China*)

Abstract: Aluminum alloy parts are usually processed by milling, and the milling parameters have an important impact on the product quality. In this paper, a time-varying model of milling cutter speed is proposed to analyze the influence of time-varying of milling cutter on aluminum alloy milling. Firstly, the time-varying model of milling cutter speed is constructed by MATLAB programming. Then the time-varying speed is introduced into the 3D aluminum alloy milling model established by finite element method. Finally, a three-dimensional model of aluminum alloy milling considering the time-varying of milling cutter speed is established, and the influence of the milling cutter's time-varying on aluminum alloy milling is analyzed. It is found that the time-varying of milling cutter speed will lead to a large dynamic change of the cutter's reaction torque and the maximum milling stress produced by the workpiece. Thus the stability of cutter speed should be ensured in the actual processing.

Key words: aluminium alloy; milling; time-varying of speed; FEM

0　引　言

随着航空工业的飞速发展，强度高、重量轻的铝合金被广泛应用于航空工业，其加工方式一般为铣削加工。铣削是一种多影响因素、多加工目标的加工过程，铣削工艺参数对成品质量存在重要影响[1-4]。目前已有大量关于铣削工艺参数对工件质量影响的研究，如郑耀辉等[5]通过建立二维有限元切削模型，计算分析了铣削工艺参数对工件表面残余应力的影响。唐超兰等[6]建立了基于 6061 铝合金铣削加工的多目标铣削参数优化模型，并实现了铣削工艺参数的优化。杨小潘等[7]对 4Cr5MoSiV1 钢的铣削特性进行研究，发现切削速度对工件残余应力的影响最大。蔡明等[8]采用有限元方法研究了 6061 铝合金微尺度铣削力影响因素，发现铣削工艺参数对铣削力的大小有着重要影响。Xin 等[9]发现铣削速度对工件残余应力存在显著影响。至此，大量研究结果表明，铣削工艺参数对工件铣削的好坏有显著的影响。在实际加工过程中，由于受到多源、多频扰动的影响[10]，机床铣刀的工作转速难以保持恒定，转速会随时间发生变化，这种转速时变性将不可避免地增加刀具所承受的瞬时反作用力，同时工件所受的切削力也瞬时变化。此外，刀具转速的时变性也会加重铣削系统的振动冲击[11]，加剧刀具磨损，降低加工质量[12]。

为研究刀具转速时变性对铝合金铣削过程的影响，笔者基于有限元分析法建立了三维铝合金铣削模型，通过编写 MATLAB 程序，实现了模拟过程中刀具转速的瞬时变化；通过将此时变转速引入所建立的三维铝合金铣削模型中，分析了考虑刀具转速时变性下的铝合金铣削加工过程，探究了刀具转速在不同时刻下的受力情况。所研究内容为铝合金铣削系统的优化设计及高质量铝合金工件的加工奠定了基础。

* 收稿日期：2023-10-20

基金项目：辽宁科技大学大学生创新创业训练计划项目经费支持。

作者简介：何东星(2003-)，男，辽宁大连人，研究方向：机械电子工程。

1 铝合金铣削模型建立

为研究刀具转速时变性对铝合金铣削过程的影响，采用 MATLAB 与有限元软件相结合的方法，建立考虑刀具转速时变性的三维切削模型。

1.1 铣削有限元模型建立

建立的铝合金三维铣削模型如图 1 所示。工件材料为 AA7075-T651 铝合金，尺寸为 10 mm×10 mm×5 mm，刀具几何参数如图 2 所示。刀具材料为硬质合金，由于刀具在铣削过程中几乎不产生变形，故刀具在模型中被认为是刚体。

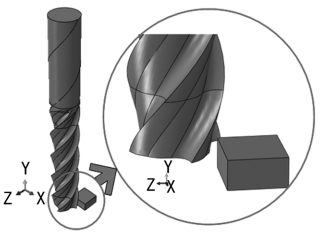


图 1 三维铣削模型

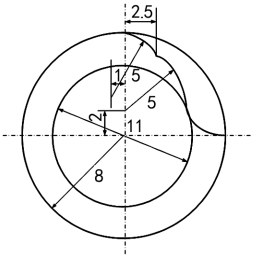


图 2 铣刀几何参数

采用 Johnson Cook 本构描述材料属性[13]，其数学表达式为：

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\varepsilon}^{p})^{n}]\left(1 + C\ln\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{p}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_{0}}\right)\left[1 - \left(\frac{T - T_{0}}{T_{m} - T_{0}}\right)\right] \tag{1}$$

式中：A、B、C、n、m 为材料参数；T_m 和 T_0 分别为材料熔化温度和参考环境温度，取值如表 1 所列；$\bar{\varepsilon}^{p}$ 为等效塑性应变；$\dot{\bar{\varepsilon}}^{p}$ 为等效塑性应变率；$\dot{\bar{\varepsilon}}_{0}$ 为参考等效塑性应变率。

表 1 Johnson Cook 模型本构参数

参 数	数 值	参 数	数 值
A/MPa	527	m	1.61
B/MPa	575	$\dot{\varepsilon}_0$/s^{-1}	1
C	0.017	T_0/K	298
n	0.072	T_m/K	908

材料失效行为采用 Johnson Cook 基于等效塑性应变建立的剪切失效损伤规律，其数学表达式为[13]：

$$\bar{\varepsilon}_{d}^{p} = \left(D_1 + D_2\exp D_3\frac{p}{\bar{\sigma}}\right)(1 + D_4\ln\dot{\bar{\varepsilon}}^{*}) \times \left[1 - D_5\left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^{m}\right] \tag{2}$$

$$\omega_d = \int\frac{\mathrm{d}\bar{\varepsilon}^{p}}{\bar{\varepsilon}_{d}^{p}} \tag{3}$$

式中：$D_1 \sim D_5$ 为材料损伤参数，见表 2；当 $\omega_d = 1$ 时，材料开始损伤，损伤开始时刻的等效塑性应变为 $\bar{\varepsilon}_{d}^{p}$。

表 2 Johnson Cook 模型损伤参数

参 数	数 值	参 数	数 值
D_1	0.11	D_4	0.016
D_2	0.572	D_5	1.099
D_3	−3.446		

损伤过程采用指数演化，表达式为：

$$D = 1 - \exp\left(-\int_{0}^{\bar{u}^{p}}\frac{\bar{\sigma}}{G_f}\mathrm{d}\bar{u}^{p}\right) \tag{4}$$

式中：$\bar{u}^{p}$ 为等效塑性位移；$\bar{\sigma}$ 为断裂应变能；G_f 为强度因子。

为节约计算成本，对刀具参与切削部分的网格进行细化处理，刀具网格如图 3 所示，其中包含 165 712 个节点，153 332 个单元，刀具网格类型均选用八节点实体单元（C3D8R）。

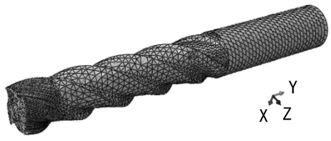


图 3 刀具网格模型

1.2 刀具转速时变性模型建立方法

由随机数 ζ 构建刀具的时变转速，表达式为：

$$n_t = n + \zeta_t A \tag{5}$$

式中：角标 t 表示时间增量；n_t 为在 t 时刻的瞬时转速；n 为刀具理论转速；ζ_t 为 t 时刻的转速随机系数；A 为刀具转速的极差。

采用 MATLAB 编写程序实现刀具时变转速的构建，具体程序流程图如图 4 所示。

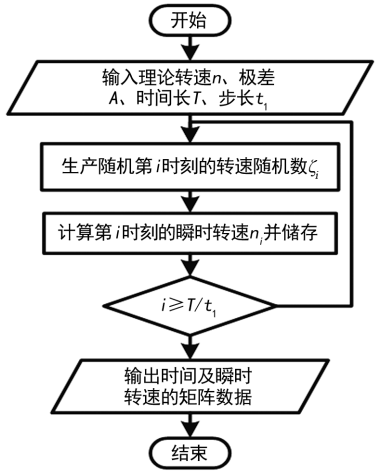


图 4 瞬时转速构建程序流程图

MATLAB 构建的刀具随机转速如图 5 所示（以理论转速为 12 000 r/min，$s_m = 10$，$s_d = 0.1$ 为例展示）。文中旨在分析刀具转速时变性对于 AA7075-T651 铣削过程的影响，故其余铣削参数取为定值，即每齿进

给量 f_z=0.15 mm/z，铣削深度 a_p=1 mm，铣削宽度 a_c=1 mm。

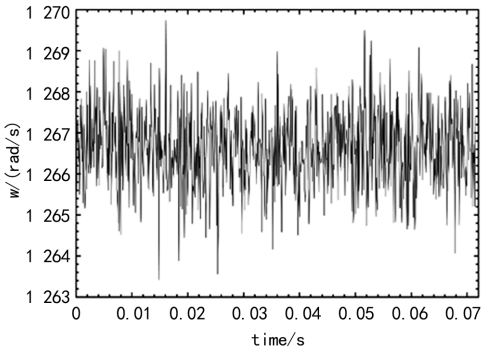


图 5　刀具随机转速

2　计算结果分析

2.1　铣削应力场分析

以刀具转速为 12 000 r/min，s_m=10，s_d=0.1 状态下的计算结果为例，展示 AA7075-T651 铝合金铣削加工过程中，工件产生的铣削应力分布，结果如图 6 所示。

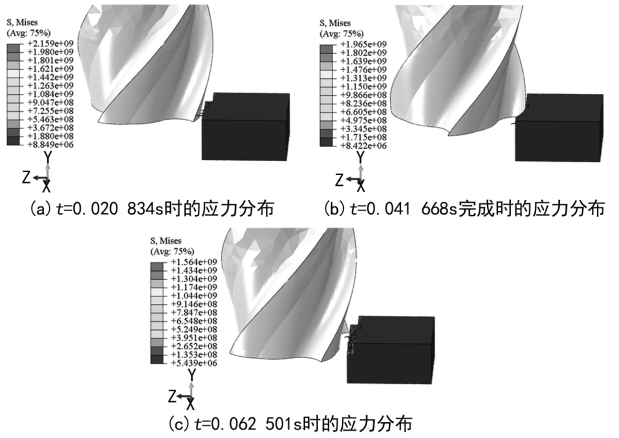


图 6　考虑转速时变性的工件铣削应力分布

由计算结果可知，工件材料在刀具的铣削作用下逐渐被去除，工件在铣削作用区域产生的应力最大；铣削完成区域产生的应力得到一定程度的释放，所以完成区域的应力略小于铣削作用区域的应力。

由于文中的铣削模型中考虑了铣刀转速的时变性，在加工过程中，刀具的转速存在变动，所以导致了工件在铣削过程中产生的应力变化程度大于不考虑刀具转速时变性的铣削过程，不考虑刀具转速时变性的计算结果如图 7 所示。

对比二者的应力变化程度可知：刀具转速时变性将导致工件产生的应力变化程度增大。因此，为减小工件产生的铣削应力，在加工过程中应当尽量保证刀具转速的稳定性。

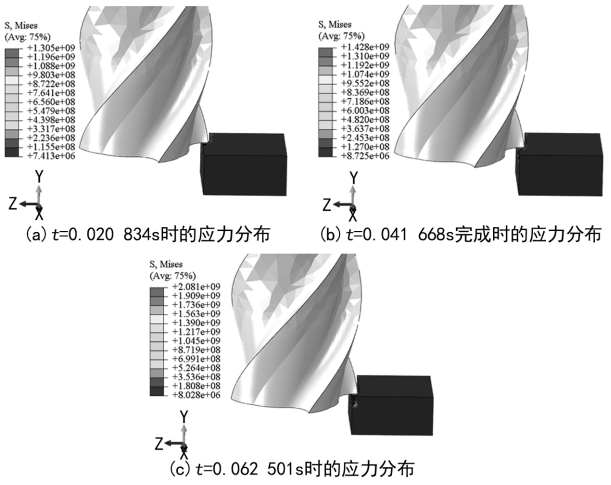


图 7　不考虑转速时变性的工件铣削应力分布

2.2　刀具转速时变性影响分析

为进一步了解刀具转速时变性对刀具所受到的反作用力矩的影响，以刀具转速 12 000 r/min，s_m=10，s_d=0.1 状态下的刀具所受阻力矩为例展开分析。刀具受到的反作用力矩变化曲线如图 8(a)所示，不考虑转速时变性的刀具反作用力矩变化曲线如图 8(b)所示。

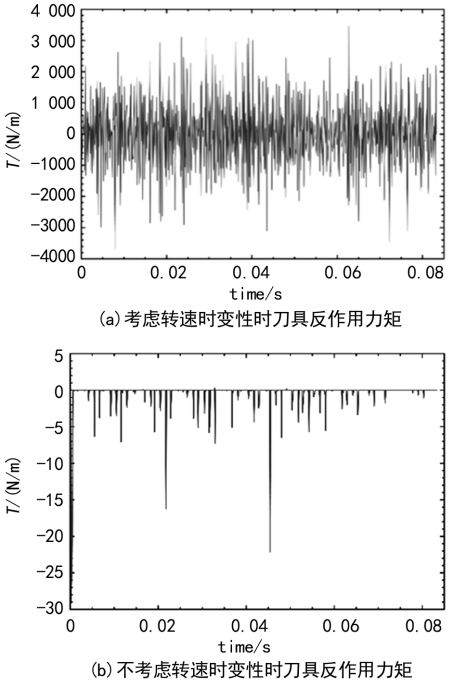


图 8　力矩变化曲线

由计算结果可知，刀具转速时变性将会导致刀具承受较大的、瞬变的反作用力矩，而不考虑转速时变性时，刀具仅在没齿铣削工件时产生反作用力矩，由此可知，在实际加工工程中，应当尽量保证刀具转速的稳定性，以保证刀具承受较小的反作用力矩，提高

刀具的使用寿命。

3　结　语

为研究刀具转速时变性对铝合金铣削过程的影响,采用 MATLAB 与有限元软件结合的方法,建立了考虑铣刀转速时变性的 AA7075-T651 铝合金铣削三维模型,基于所建立的模型计算了不同时变特征下的铣削加工过程,通过对比是否考虑转速时变性发现:刀具转速时变性将导致工件铣削应力变化程度增大,考虑时变性的工件最大应力大于不考虑时变性的工件。考虑刀具转速时变性后,发现刀具承受较大的、瞬变的反作用力矩,而不考虑转速时变性时,刀具仅在没齿铣削工件时产生反作用力矩。文中研究的内容为铝合金铣削系统的优化设计及高质量铝合金工件的加工提供了理论基础。

参考文献:

[1] CHEN X L, TANG J Y, DING H, et al. Experimental study on the evolution of chip morphology, chip formation, and surface topography with cutting parameters, and their relationships in dry milling of cast aluminum alloy with PCD inserter[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2021,4(35):1651-1662.

[2] KARKALOS N E, KARMIRIS-OBRATANSKI P, KURPIEL S, et al. Investigation on the Surface Quality Obtained during Trochoidal Milling of 6082 Aluminum Alloy[J]. Machines,2021,9(4):1-15.

[3] WANG B, LIU Z Q, CAI Y K, et al. Advancements in material removal mechanism and surface integrity of high-speed metal cutting: A review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2021,7(166):103744.

[4] LI S Y, SUI J B, DING F, et al. Optimization of Milling Aluminum Alloy 6061-T6 using Modified Johnson-Cook Model [J]. Simulation Modelling Practice and Theory,2021,9(111):102330.

[5] 郑耀辉,赵明月,刘　娜,等.2024 铝合金铣削加工表面残余应力仿真研究[J].组合机床与自动化加工技术,2019(7):34-38.

[6] 唐超兰,谢　义.6061 铝合金铣削工艺参数多目标优化[J].广东工业大学学报,2020,37(5):87-93.

[7] 杨小璠,刘菊东,李凌祥,等.整体硬质合金球头铣刀铣削典型模具钢 4Cr5MoSiV1 特性实验研究[J].哈尔滨理工大学学报,2020,25(3):68-74.

[8] 蔡　明,巩亚东,于　宁,等.铝合金 6061 微尺度铣削的铣削力仿真与实验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(1):76-81.

[9] XIN H M, SHI Y Y, NING L Q, et al. Residual Stress and Affected Layer in Disc Milling of Titanium Alloy[J]. Materials and Manufacturing Processes,2016,31(13):1645-1653.

[10] 权　力,赵万华.铣削过程多源扰动影响下直线电机推力电流频谱特性分析[J].西安交通大学学报,2021,55(4):8-19.

[11] 李广伦,姜兆亮,赵　丽,等.铝合金薄板的铣削动力响应特性仿真与实验研究[J].振动与冲击,2020,39(11):63-68.

[12] HUANG Y X, LU Z Y, DAI W, et al. Remaining Useful Life Prediction of Cutting Tools Using an Inverse Gaussian Process Model [J]. Applied Sciences-Basel,2021,6(11):5011.

[13] 殷继花,林有希,孟鑫鑫,等.航空铝合金 7075-T651 高速铣削锯齿形切屑的形成机理研究[J].表面技术,2019,48(5):275-285.

(上接第 7 页)

测试结果表明:与后桥试验样机处于初始状态时的试验结果相比,处于优化状态下的后桥试验样机传动效率值最高可提高约 1.21%。

4　结　语

文中研究了轮毂轴承的工作游隙、密封形式选择以及润滑脂性能表现对微型汽车后桥传动效率的影响规律。研究表明:轮毂轴承的工作游隙控制、密封形式选择以及润滑脂性能表现均能对微型汽车后桥传动效率产生较为明显的影响,其可作为直接优化改进措施用于改善微型汽车燃油经济性并获得极佳的技术经济性。

参考文献:

[1] 燕松山,汪明明,解　芳,等.高温自润滑滚子轴承游隙匹配设计研究[J].润滑与密封,2022,47(3):10-15.

[2] 刘　兵.汽车第三代轮毂轴承游隙检测技术研究[D].杭州:浙江农林大学,2018.

[3] 王建华,黄德杰.轮毂轴承摩擦力矩特性及其试验研究[J].机电工程,2020,37(6):677-681.

[4] Guo Y, Parker R G. Dynamic analysis of planetary gears with bearing clearance[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2012,7(4):2980-2984.

[5] 白雪峰,郭长建,赵联春.滚动轴承最佳工作游隙的确定及分析[J].轴承,2013(9):1-5.

[6] 温　晶.深沟球轴承密封结构分析及优化设计[D].大连:大连交通大学,2020.

[7] 林海波,杨建西.高速球轴承润滑与密封结构改进设计与试验[J]. 机械传动,2022,46(5):139-143.

[8] 刘兴纯,周春宇.深沟球轴承密封结构的优化设计[J].哈尔滨轴承,2016,37(4):5-6+41.

[9] 王国辉,雷良育,荆家宝,等.汽车轮毂轴承单元密封件设计改进及分析[J].邵阳学院学报(自然科学版),2019,16(4):45-51.

[10] 郑　博.滚动轴承润滑脂综合性能评价[D].洛阳:河南科技大学,2020.