

引文格式: 高秋阁, 张立强, 杨杰, 等. 基于ABAQUS 镜像铣削铝合金表面残余应力有限元分析[J]. 航空制造技术, 2024, 67(6): 92-99.

GAO Qiuge, ZHANG Liqiang, YANG Jie, et al. Finite element analysis of residual stress on aluminum alloy surface based on ABAQUS mirror milling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(6): 92-99.

基于ABAQUS 镜像铣削铝合金表面残余应力有限元分析

高秋阁, 张立强, 杨杰, 钱 栋

(上海工程技术大学, 上海 201620)

[摘要] 为了分析铣削工艺参数对铝合金的已加工表面残余应力的影响, 借助金属切削有限元分析等相关理论, 以6061 铝合金为工件材料, 建立了铣削加工的有限元模型。采用单因素法对6061 铝合金进行镜像铣削仿真, 并分析不同的主轴转速、铣削深度、铣削路径对加工的表面残余应力的影响。研究表明, 在铝合金6061 加工过程中, 对工件表面残余应力影响因素由小到大依次为铣削深度 < 铣削路径 < 主轴转速, 铣削深度对已加工表面残余应力影响较小, 主轴转速对已加工表面残余应力影响最大, 镜像铣削最优组比普通铣削形变位移减小33%。

关键词: 铝合金; 残余应力; 镜像铣削; ABAQUS; 铣削路径

Finite Element Analysis of Residual Stress on Aluminum Alloy Surface Based on ABAQUS Mirror Milling

GAO Qiuge, ZHANG Liqiang, YANG Jie, QIAN Long

(Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[ABSTRACT] In order to analyze the influence of the milling process parameters on the residual stress of the machined surface of aluminum alloy, according to the related theories of metal cutting finite element analysis, the aluminum alloy 6061 was used as the workpiece material, and the finite element model of milling was established. The single factor method is used to simulate the mirror milling of aluminum alloy 6061, and the influence of different spindle speed, milling depth and milling path on the surface residual stress of aluminum alloy 6061 is analyzed. The research shows that during the processing of aluminum alloy 6061, the influencing factors on the surface residual stress of the workpiece in descending order are milling depth < milling path < spindle speed. The spindle speed has the greatest influence on residual stress of the machined surface, and the optimal group of mirror milling reduces the deformation displacement by 33% compared with ordinary milling.

Keywords: Aluminum alloy; Residual stress; Mirror milling; ABAQUS; Milling path

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.06.092

铝合金作为工业上高强度材料之一, 因具有高强度比、低锻造温度、良好的断裂特性和优异的抗应力腐蚀性等特性, 在军事和航空航天领域应用非常普遍。本文所研究的6061 铝合金多用于航空领域, 其工作环境要求工件精度高, 蒙皮最薄处仅有1 mm, 其厚度较薄, 在加工过程中会出现加工误差, 零件加工精度达不到要求, 然而, 精度的满足是保证工作性能的基本前提之一^[1]。当前, 有很多学者采用对镜像铣削的仿真和结构分析进行

研究, 祝小军^[2-3]采用镜像五轴结构对其进行仿真的分析, 并对飞机蒙皮镜像铣削原理和算法进行研究分析, 提出更为合适的加工路线和铣削加工方法。薄壁件类零件在加工时极不稳定, 颤振问题很难控制^[1]。王昌瑞等^[4]对飞机蒙皮镜像铣削加工的稳定性进行了分析, 通过铣削有限元分析稳定性变化, 做出了准确的预测并且用激光非接触测量判定切削状态。在国内以及国外众多机械研究机构和生产制造厂家提出蒙皮镜像铣削加

工技术 (Mirror milling system, MMS)^[5-7]。镜像铣削加工技术主要是保证镜像装置和刀具主轴的一致性同步运动来保证对工件的定位支撑能够有效防止颤振。广东工业大学的唐超兰等^[8]对 6061 铝合金的切削工艺参数进行多目标优化。在金属的切削加工过程中,由于在加工层面产生了巨大的塑性变形和温度急剧升高,形成了局部热-力耦合产生的应力场,其分布局部均匀。本文主要对薄壁件的铣削模型进行分析研究,运用有限元分析法对实际切削加工过程中切屑移除、变形等问题进行仿真分析,研究加工路径、加工深度和主轴转速对样件表面上的残余应力的影响有何规律。

1 有限元建模

1.1 几何建模

建立几何模型,通过 ABAQUS 有限元软件建立工件镜像铣削示意图及几何模型,如图 1 所示。

在铣削加工中,工件受到多方面的影响,包括加工参数、加工环境及切削热等因素^[9],建立准确的刀具铣削微元模型和坐标系统是建模的基础。

现在对刀具进行以下规定:(1)假定刀具是刚体,不考虑其磨损;(2)由温度因素造成的化学变化情况,予以忽略;(3)被加工的工件材料是各向同性的;(4)不考虑刀具,工件的振动。采用材料为 PCD 硬质合金铣刀进行铣削,铣刀刀具的模型如图 2 所示,其中刀具直径为 20 mm,圆角半径为 3 mm,刀具定义为刚体。

1.2 工件材料参数

工件材料是 6061 铝合金,其物理性能如表 1 所示^[10]。

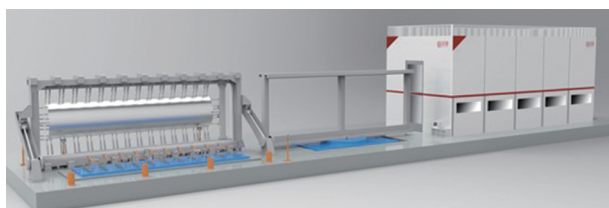
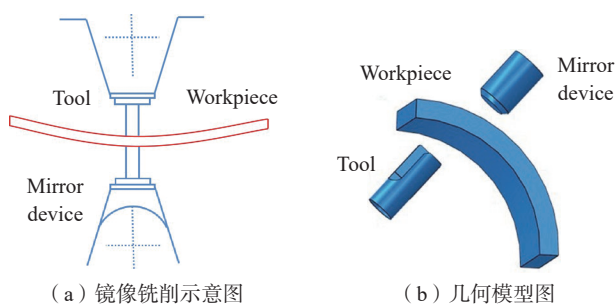


图 1 镜像铣削仿真原理及模型图

Fig.1 Mirror milling simulation principle and model diagram

1.3 切削方程

本构模型与切削仿真的准确性有着密切的关系,具体如式(1)所示^[11]。Johnson-Cook 材料本构模型的关系如式(2)所示^[12]。在切削过程中材料会受到塑性屈服等因素的影响,需要借助材料力学中的行为描述模拟结构的瞬时响应参数,Johnson 和 Cook 建立了屈服函数的失效应变函数,如式(3)所示^[13]。对 Al6061 进行模拟,采用的 Johnson-Cook 材料模型参数如表 2 所示^[14]。表 3 是 Al6061 的 Johnson-Cook 剪切失效模型参数^[14]。

$$\sigma = f(\varepsilon, \bar{\varepsilon}, T) \quad (1)$$

式中, σ 为材料内部流动应力; ε 为应变力; $\bar{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率; T 为温度。

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\varepsilon})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right] (1 - T_h^m) \quad (2)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为 von Mises 流动应力; $\bar{\varepsilon}$ 为等效塑性应变; $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ 为参考应变率; $T_h = \frac{T + T_r}{T_m - T_r}$ 为无量纲温度; T_m 为熔点; T_r 为室温; $\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right]$ 为材料的应变率强化效应; $(1 - T_h^m)$ 为材料的热软化效应; A, B, C, m, n 是材料的本构方程参数,分别为参考应变率和参考温度下的初始屈服应力、应变硬化模量、应变率强化参数、热软化指数、硬化指数。其中参考应变率 $\dot{\bar{\varepsilon}}_0 = 0.001/s$, $T_r = 20^\circ\text{C}$, $T_m = 1660^\circ\text{C}$ 。

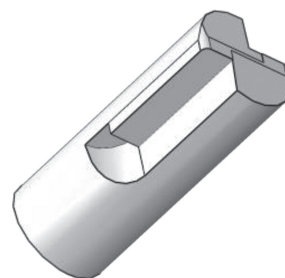


图 2 PCD 刀具几何模型
Fig.2 PCD tool geometry model

表 1 工件基本物理性能参数^[10]

Table 1 Basic physical performance parameters of the workpiece^[10]

物理量	数值
密度	2700 kg/m ³
弹性模量 E	7×10^4 MPa
泊松比 ν	0.3
热导率	100 W/(m·K)
热膨胀系数 K	$1.35 \times 10^{-5}/\text{K}$
比热	700 J/(kg·K)

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \bar{\epsilon}^*][1 + D_5 T^*] \quad (3)$$

式中, ϵ^f 为失效塑性应变; $D_1 \sim D_5$ 为材料失效模型参数; σ^* 为静水压力与等效应力的比值; $[D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*]$ 表达材料的破坏应变与应力三轴关系; $[1 + D_4 \ln \bar{\epsilon}^*]$ 为材料应变率对破坏应变的影响; $[1 + D_5 T^*]$ 为温度的热软化效应对材料韧性的影响。

1.4 仿真创建设置

采用动态力学分析创建分析步,暂不考虑温度的传递。在设置刀具与工件之间的作用之前进行接触设置,需先对刀具和顶撑装置进行刚体化。创建交互属性刀具和工件之间切向接触方式,罚函数作为摩擦公式,摩擦系数取 0.5。法向接触方式采用硬接触、保证切削力在单元格之间的传导。

由于模拟切屑失效的过程是动态的,材料温度等条件参数会发生变化,材料的失效需要由塑性应变累积准则进行判断,即 $D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\epsilon_f^p}$,其中, D 是损伤参数, $\Delta \bar{\epsilon}^p$ 是有效塑性应变增量。对整个仿真过程的增量进行累加,当 D 的值达到 1 的时候,材料就可以视为断裂。

2 有限元仿真

残余应力可以分为 3 类,包括机械应力导致的塑性变形、热应力导致的塑性变形及相变引起的塑性变形。从 6061 铝合金的仿真分析可知,切削生成的切削热远不及铝材的相变温度,而热应力又很小,远未超过

铝材的屈服极限,故此主要分析由机械应力产生的残余应力。

工件的表面残余应力经历 4 个阶段,即切削加工阶段、卸载阶段、约束转换阶段及冷却阶段^[15-16]。残余应力提取是从刀具切入工件达到稳定切削之后,再到切削结束之前这个阶段,但是需要注意的是,此时提取的残余应力包含了切削热与切削力所带来的影响。而本文所做的工作均是在切削结束后进行的,此时提取的残余应力不受切削热与切削力影响。

在仿真分析中,采用 ABAQUS/Explicit 求解器对 6061 铝合金进行研究。

2.1 加工路径对残余应力的影响

探究加工路径对残余应力的影响,需分别对 S 型、回型和单向型 3 种路径进行加工路径的影响分析,具体加工方式如图 3 所示,试验参数及加工方式如表 4 中试验 1~3 所示。

在铣削工件的加工过程中,加工表面的应力会随着刀具位置的变化而变化^[17]。为减小应力对提取数据的影响,在完成加工后,提取加工表面的残余应力数据,并通过 MATLAB 对数据进行处理。

图 4 是不同加工路径下,样件表面的残余应力分布,以及加工后的样件表面形变位移图。图 5 是取加工表面上的一组形变位移数据绘制的误差棒图和折线图,以及加工路径对最大残余应力影响的折线图。

从图 4 可知,在以不同路径进行铣削加工时,单向

表 2 Johnson-Cook 材料模型参数^[14]
Table 2 Johnson-Cook material model parameters^[14]

类别	参数
A/MPa	324
B/MPa	144
n	0.42
C	0.002
m	1.34

表 3 Johnson-Cook 剪切失效模型参数^[14]
Table 3 Johnson-Cook shear failure model parameters^[14]

类别	参数
D_1	0.071
D_2	1.248
D_3	-1.142
D_4	0.147
D_5	0

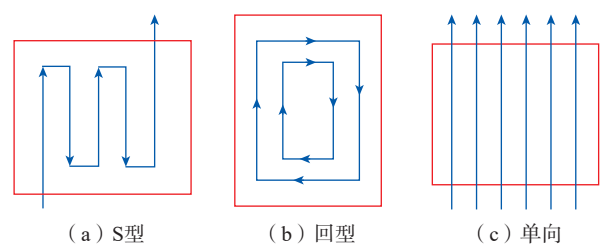


图 3 加工路径
Fig.3 Processing paths

表 4 试验参数及加工方式
Table 4 Experimental parameters and processing methods

试验编号	切削深度/mm	主轴转速/(r/min)	加工路径
1	0.3	3000	回型
2	0.3	3000	S 型
3	0.3	3000	单向
4	0.1	2000	单向
5	0.3	2000	单向
6	0.5	2000	单向

型走刀路线的残余应力分布是最均匀的,在一定范围内得到的表面形变位移矢量云图也是最可靠的。从图 5 可知,单向走刀后加工表面的残余应力较为平缓且相对

集中,其在加工面的边缘突变应力比回型和 S 型路径要小。故可得出,单向走刀路径较为可靠。可以看出,在单向走刀路线下,其最大残余应力是最小的。

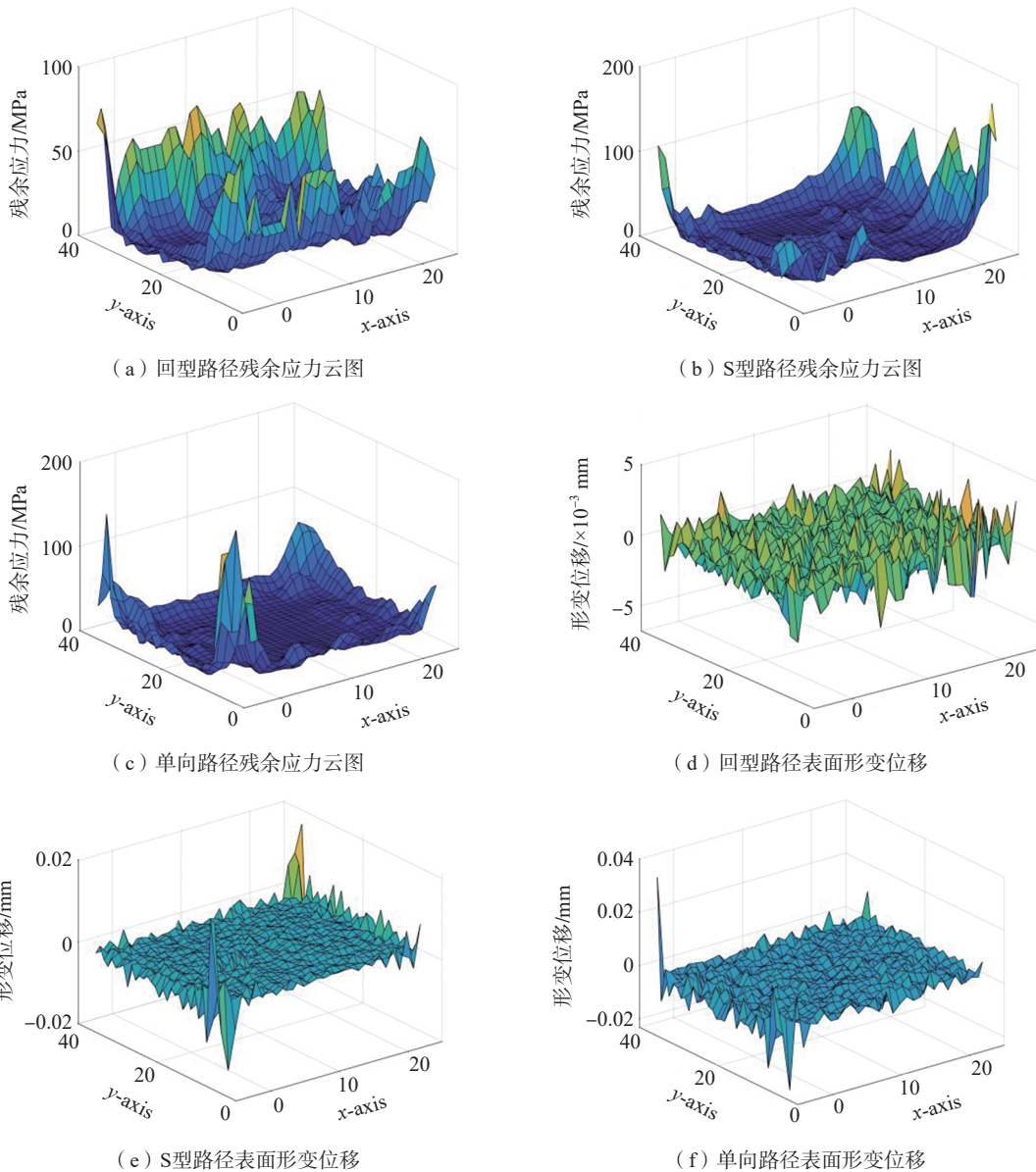


图 4 不同路径下铣削残余应力云图及表面形变位移矢量云图

Fig.4 Cloud diagram of residual stress in milling of different paths and vector diagram of surface deformation and displacement

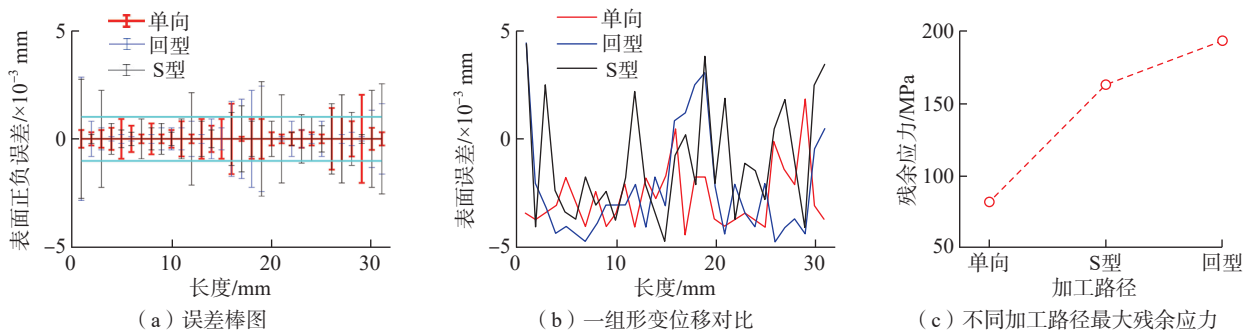


图 5 不同路径铣削形变位移矢量误差棒图及最大残余应力对比

Fig.5 Deformation displacement vector error bar graph and maximum residual stress comparison of different milling path

2.2 加工深度对残余应力的影响

结合 2.1 节中仿真效果可知,单向走刀路径仿真结果较为理想。为分析加工深度对残余应力的影响,加工路径采用单向走刀方式,具体加工参数如表 4 中试验 4~6 所示。

图 6 为不同切削深度下的样件加工表面残余应力分布图及加工表面的形变位移图。图 7 为加工表面上的一组形变位移数据绘制的误差棒图和折线图以及切削深度对最大残余应力影响的折线图。

从图 6 可知,在以不同铣削深度进行铣削加工时,铣削深度为 0.1 mm 时的残余应力分布是最均匀的,在一定范围内得到的表面形变位移矢量云图也是最可靠的,其次是 0.3 mm。从图 7 可知,切削深度较小时的残

余应力较为平缓且相对集中。整体而言,切削深度对表面残余应力的综合影响不如切削路径影响程度大。可以看出,铣削深度对残余应力的影响趋势相似。

2.3 加工速度对残余应力的影响

为探究加工速度对残余应力的影响,结合 2.1 节和 2.2 节的仿真可知,在单向走刀和切削深度为 0.1 mm 时得到的仿真结果是最为理想的,故选择切削深度为 0.1 mm 和单向加工路径,具体主轴转速见表 5。图 8 是不同转速下加工表面的残余应力分布及不同主轴转速加工下的工件表面形变位移图。图 9 (a) 和 (b) 是取加工表面上的一组形变位移数据绘制的误差棒图和折线图,以及主轴转速对最大残余应力影响的折线图。

从图 8 可知,在不同主轴转速下进行镜像铣削加工

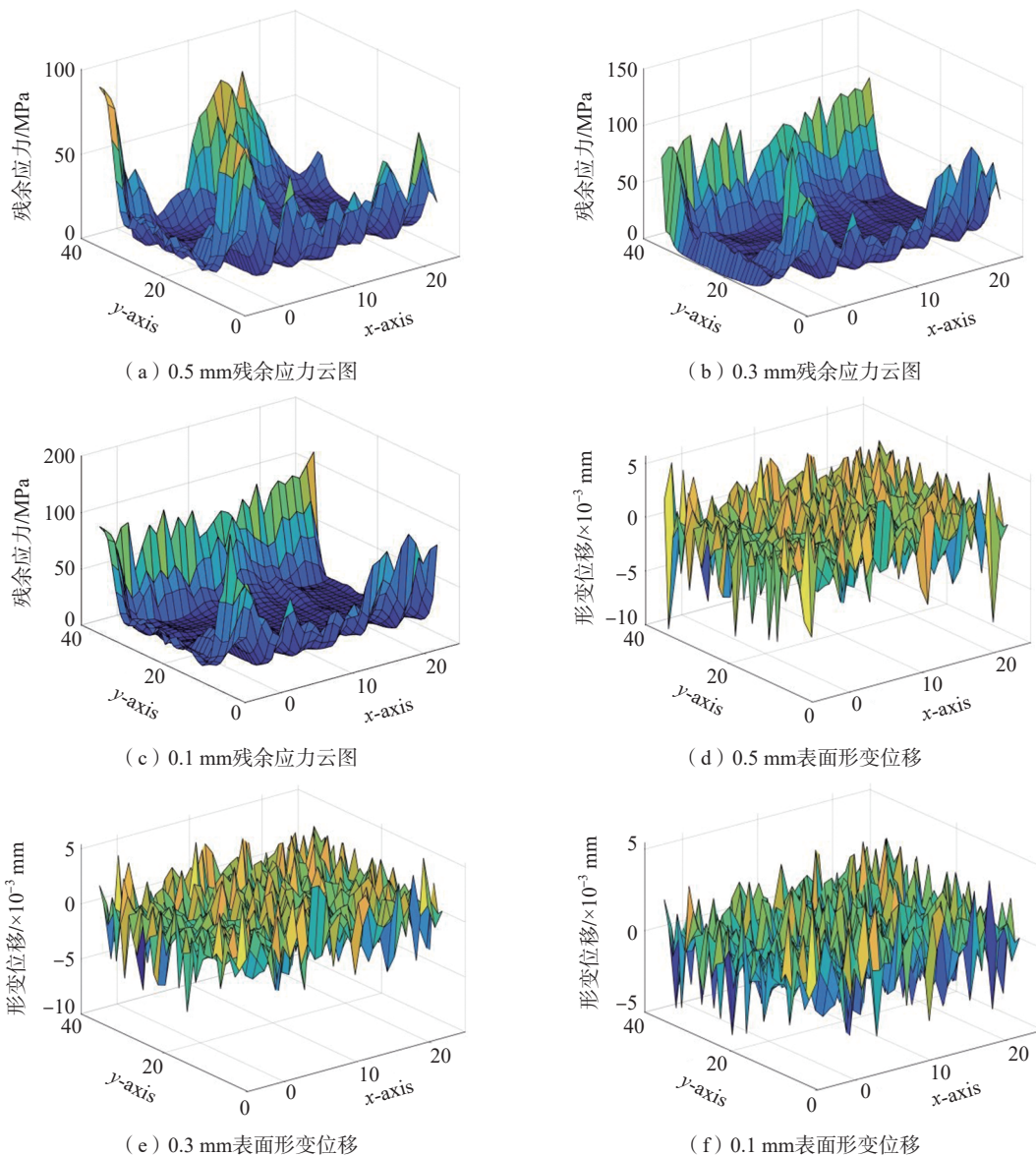


图 6 不同铣削深度下残余应力云图及表面形变位移矢量云图

Fig.6 Residual stress cloud diagram and surface deformation displacement vector cloud diagram under different milling depths

时,转速为 8000 r/min 时的残余应力分布是最均匀的,在一定范围内得到的表面形变位移矢量云图也是最可靠的,其次是 7000 r/min。从图 9 可知,单向走刀路线,

切削深度为 1 mm,主轴转速为 8000 r/min 时的残余应力较为平缓且相对集中,且从图 8 和 9 可以看出,主轴转速对残余应力分布的影响趋势相似。高速切削加工

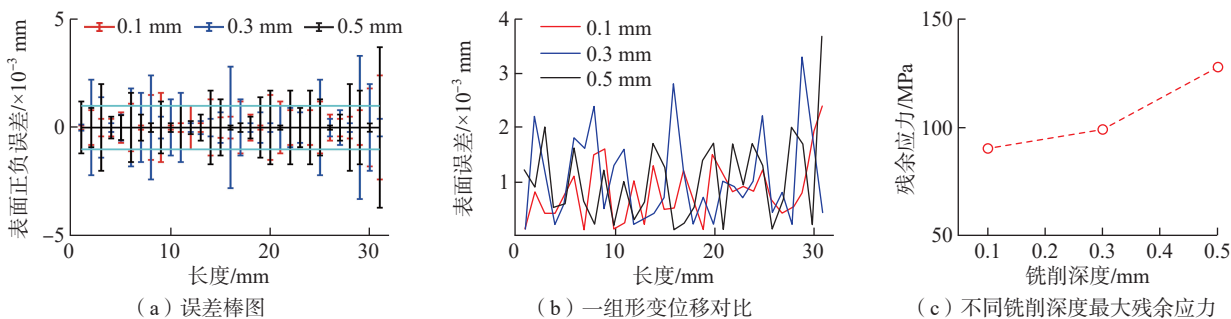


图 7 不同深度铣削形变位移矢量误差棒图及最大残余应力对比

Fig.7 Deformation displacement vector error bar graph and maximum residual stress comparison under different milling depth

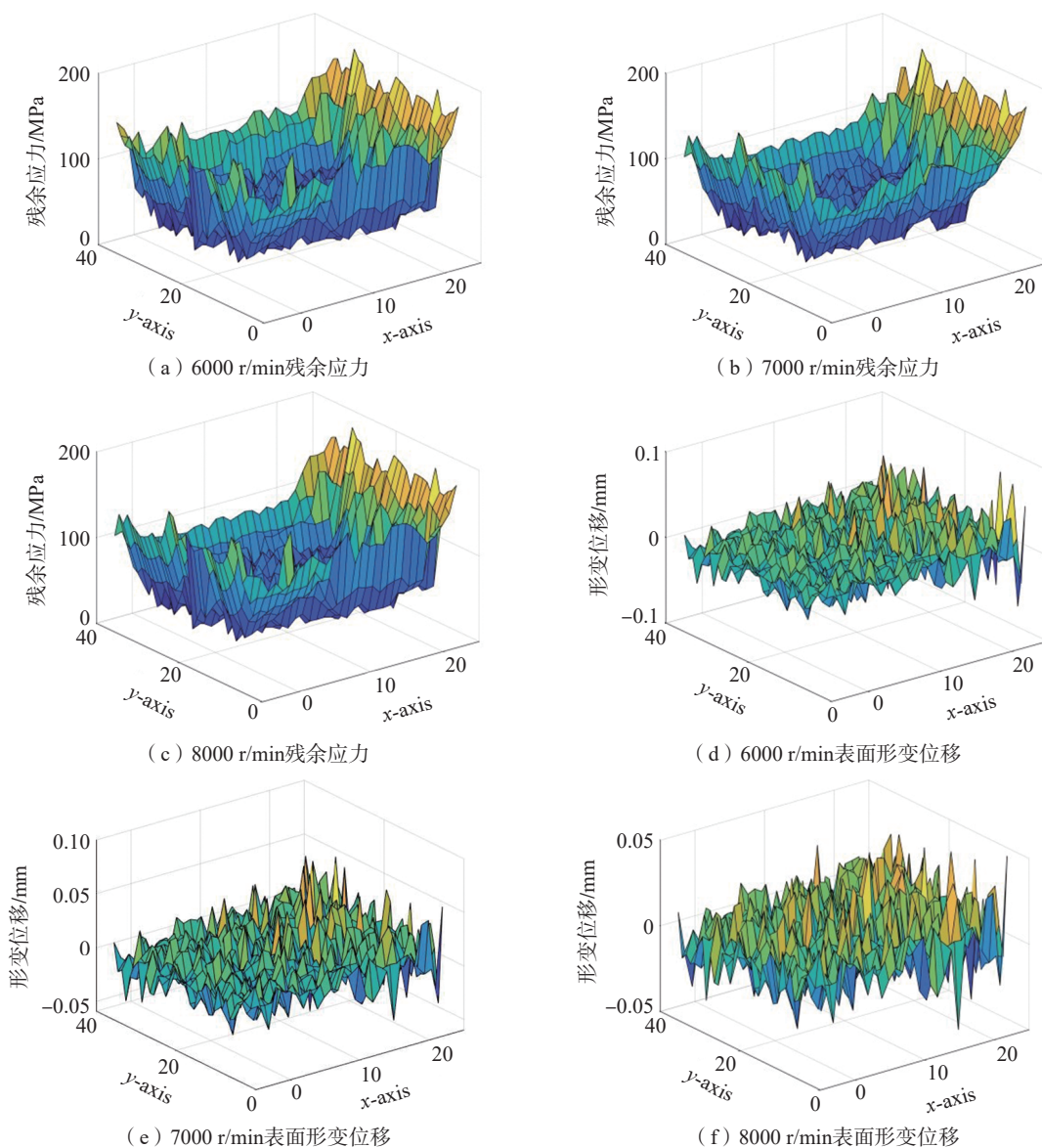


图 8 不同转速下残余应力云图及表面形变位移矢量云图

Fig.8 Residual stress cloud diagram and surface deformation displacement vector cloud diagram at different speeds

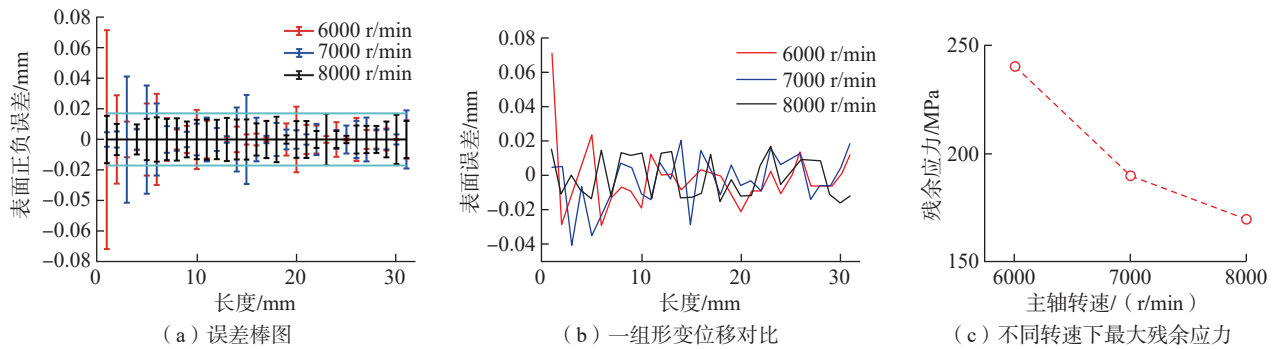


图9 不同主轴转速下形变位移矢量误差棒图及最大残余应力对比

Fig.9 Deformation displacement vector error bar graph and maximum residual stress comparison under different spindle speeds

主轴转速一般是普通切削的5~10倍,铝合金材料主轴转速一般取8000 r/min,从图8(e)和(f)可以侧面验证高速切削后的表面质量高于低中速切削加工后的表面质量。

2.4 讨论

由2.1节、2.2节和2.3节可知,单向走刀切削深度为0.1 mm,在高速切削时,镜像铣削加工得到的表面质量最优。为探究普通数控铣削加工与镜像铣削加工两种加工方法加工后零件表面质量的优劣,设置10组试验,采用单向走刀,切削深度0.1 mm、主轴转速8000 r/min,加工方式为普通数控加工。

图10为在相同加工参数下普通铣削加工仿真时得到残余应力分布云图及加工表面形变位移矢量云图。对比图8(c)和(f)可以看出,在相同条件下,镜像铣削加工后的表面质量远高于普通铣削加工后的表面质量。

铣削路径因素列: 1<2<3,单向轨迹路线为最优路径;

铣削深度因素列: 6<5<4,铣削深度为0.1 mm;

主轴转速因素列: 7<8<9,主轴转速8000 r/min为最优转速。

将2.1节、2.2节和2.3节中的9组镜像铣削仿真3种不同因素对残余应力和最大形变的影响,与2.4节中第10组的普通数控加工仿真试验进行对比,数据分析如表6所示。

从图4(f)、图6(f)、图8(f)及表6可以得到最优的加工路径、切削深度和主轴转速参数。

用最优组参数进行普通铣削加工仿真,将得到的结果与镜像铣削加工结果对比,镜像铣削的优势明显,最大形变位移减小了33%。

3 结论

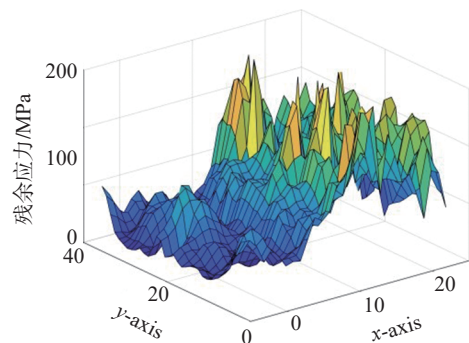
(1)在ABAQUS有限元仿真中,在镜像铣削6061铝合金的加工仿真中,影响表面残余应力的因素顺序为

主轴转速>加工路径>铣削深度。仿真分析证明,对比组镜像铣削加工后的形变位移比普通铣削加工减小了33%,但由于在仿真中为理想状态,且和实际加工有偏

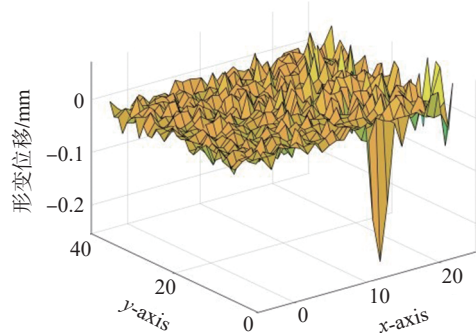
表5 不同主轴转速试验参数

Table 5 Test parameters for different spindle speeds

试验编号	切削深度/mm	加工路径	切削速度/(r/min)
7	0.1	单向路径	6000
8	0.1	单向路径	7000
9	0.1	单向路径	8000



(a) 表面残余应力云图



(b) 表面形变位移

图10 普通铣削加工表面残余应力云图与表面形变位移矢量图

Fig.10 Residual stress cloud diagram and the deformation displacement vector diagram of the surface through conventional milling

表6 不同影响因素对比

Table 6 Comparison of different influencing factors

试验编号	影响因素	最大残余应力/MPa	最大形变位移/mm
1	路径	89	0.0052
2	路径	160	0.0213
3	路径	190	0.0364
4	切削深度	90	0.0043
5	切削深度	100	0.0046
6	切削深度	128	0.0057
7	主轴转速	237	0.0714
8	主轴转速	185	0.0681
9	主轴转速	175	0.0450
10	对比组	190	0.0680

差,有些地方还需进一步改进。

(2)从 ABAQUS 仿真中可以得到最佳的加工组合,即在主轴转速 8000 r/min、单向走刀路线、铣削深度 0.1 mm 时得到的加工表面上的残余应力最小,其表面的形变位移也是最优的。

参考文献

- [1] 鲍岩,董志刚,朱祥龙,等.蒙皮镜像铣削支撑技术的研究现状和发展趋势[J].航空学报,2018,39(4):021817.
- BAO Yan, DONG Zhigang, ZHU Xianglong, et al. Review on support technology for mirror milling of aircraft skin[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(4): 021817.
- [2] 祝小军,向兵飞,康晓军,等.双五轴镜像结构运动与仿真研究[J].航空精密制造技术,2020,56(3):1-5.
- ZHU Xiaojun, XIANG Bingfei, KANG Xiaojun, et al. Research of motion and simulation technology on double-five-axis mirror structure[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2020, 56(3): 1-5.
- [3] 祝小军,向兵飞,汪洋华,等.飞机蒙皮镜像铣切原理与算法分析[J].教练机,2015(2):23-27.
- ZHU Xiaojun, XIANG Bingfei, WANG Yanghua, et al. Application and research of mirror milling technology for aircraft skin[J]. Trainer, 2015(2): 23-27.
- [4] 王昌瑞,康仁科,鲍岩,等.飞机蒙皮镜像铣加工稳定性分析[J].航空学报,2018,39(11):422121.
- WANG Changrui, KANG Renke, BAO Yan, et al. Stability analysis of aircraft skin mirror milling process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(11): 422121.
- [5] 张志国,徐学民.MMS:新型绿色蒙皮加工系统[J].航空制造技术,2010,53(19):84-86.
- ZHANG Zhiguo, XU Xuemin. MMS: The latest green skin machining system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(19): 84-86.
- [6] 鲁达.新一代飞机蒙皮绿色加工技术[J].航空制造技术,2010,53(16):102-103.
- LU Da. New generation green machining technology for aircraft skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(16): 102-103.
- [7] 徐明,向兵飞,李响,等.蒙皮镜像铣切系统及先进制造工艺的应用[J].制造技术与机床,2014(11):40-43.
- XU Ming, XIANG Bingfei, LI Xiang, et al. Application of skin mirror milling system and advanced manufacturing process[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2014(11): 40-43.
- [8] 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.
- TANG Chaolan, XIE Yi. A multi-objective optimization of milling parameters for 6061 aluminum alloy[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2020, 37(5): 87-93.
- [9] 王婷.超高强度钢磨削表面变质层研究[D].西安:西北工业大学,2015.
- WANG Ting. Research on surface affected layer in grinding ultra-high strength steel[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [10] 马敏燕.金刚石刀具车削铝合金6061的有限元分析和实验研究[D].广州:广东工业大学,2018.
- MA Minyan. Finite element analysis and experimental study on turning aluminum alloy 6061 with diamond tool[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
- [11] SHI J, LIU C R. The influence of material models on finite element simulation of machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(4): 849-857.
- [12] HIBBIT K S I. ABAQUS analysis user's manual help online[S]. 1995.
- [13] BRIDGMAN P W. Studies in large plastic flow and fracture[M]. Cambridge: Harvard University Press, 1964.
- [14] 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.
- WAN Xiulong. Numerical modeling of metallic materials and machining parameters optimization using FEM[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [15] 王神洲,徐人平,郭森.LY12硬铝合金高速切削加工残余应力的研究[J].中国制造业信息化,2011,40(19):33-37.
- WANG Shenzhou, XU Renping, GUO Miao. Research of residual stresses on high-speed machining of hard alloy LY12[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2011, 40(19): 33-37.
- [16] 孙雅洲,刘海涛,卢泽生.基于热力耦合模型的切削加工残余应力的模拟及试验研究[J].机械工程学报,2011,47(1):187-193.
- SUN Yazhou, LIU Haitao, LU Zesheng. Finite element simulation and experimental research of residual stresses in the cutting based on the coupled thermo-mechanical model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 187-193.
- [17] 黄尧,牛雪梅,闫献国,等.钛合金铣削加工表面残余应力有限元仿真[J].组合机床与自动化加工技术,2020(2):29-33.
- HUANG Yao, NIU Xuemei, YAN Xianguo, et al. Finite element simulation of residual stress in milling of titanium alloy[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(2): 29-33.

通讯作者:张立强,教授,博士,研究方向为智能制造与数控技术、复合材料结构健康诊断、航空装备数字孪生。

(责编 阳光)