

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2023.05.010

长梁类整体结构件加工过程变形稳定性控制

樊龙欣, 李 健, 刘二亮, 朱柏崴, 韩 宁

(常州大学 机械与轨道交通学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 加工变形一直是困扰航空制造业的一个严重问题。文章以航空长梁类零件为研究对象, 分析了由材料内部初始残余应力引起的弯曲能量的演变, 定义了加工变形稳定性和弯曲势能指标, 提出了一种通过优化材料去除顺序来控制变形稳定性的方法。最后, 采用实例进行理论分析、仿真分析和加工试验验证。结果表明, 通过优化材料去除顺序, 零件精加工阶段变形稳定性显著提高。

关键词: 加工变形; 残余应力; 整体结构件; 变形稳定性控制

中图分类号: TH 161

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2023)05-0076-07

Stability control for machining distortion of monolithic beam components

FAN Longxin, LI Jian, LIU Erliang, ZHU Baiwei, HAN Ning

(School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Machining distortion has always been a serious problem perplexing the aviation manufacturing industry. Taking the long beam parts as the research object, this paper analysed the evolution of bending energy caused by the initial residual stress in the material, defined the indexes of machining distortion stability and bending potential energy, and put forward a method to control the distortion stability by optimizing the release of bending potential energy. The results of theoretical analysis, simulation and machining test show that the stability of machining distortion in finishing stage can be significantly improved by optimizing the material removal sequence.

Key words: machining distortion; residual stress; monolithic structural part; machining distortion stability control

整体结构件在航空工业中被广泛应用, 而结构件加工变形是困扰航空制造业已久的问题, 它会导致直接经济损失和大量的资源浪费^[1]。残余应力的释放是导致加工变形的一个重要原因^[2]。加工变形

收稿日期: 2023-02-10。

作者简介: 樊龙欣(1989—), 男, 河南南阳人, 博士, 讲师。E-mail: fanlx@cczu.edu.cn

引用本文: 樊龙欣, 李健, 刘二亮, 等. 长梁类整体结构件加工过程变形稳定性控制[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2023, 35(5): 76-82.

与残余应力之间的关系已被广泛研究。BRINKSMEIER 等^[3]指出,残余应力在零件变形中起着关键作用。HUSSON 等^[4]研究了残余应力对齿轮加工变形的影响,结果表明通过热处理可以调节半成品的残余应力,减少加工变形。HEINZEL 等^[5]提出了一种新的多层应力模型,该模型综合了加工残余应力和工件内部初始内应力的影响,预测残余应力是导致加工变形的原因。

研究人员开展大量的研究工作集中于控制加工变形。BRINKSMEIER 等^[6]研究了齿轮制造过程,以尽量减少形状偏差。结果表明,通过分割材料去除区域,调节去除顺序分配,可以控制零件表面硬化后的变形幅度和方向。LU 等^[7]提出了一个用于预测涡轮盘粗加工和精加工过程的加工变形模型,并且通过在涡轮盘粗加工过程中改变加工路径减少变形。CERUTTI 等^[8]详细分析了加工工艺参数(如加工顺序)对最终零件加工质量的影响,发现了一个能够使残余应力实现连续稳定释放的加工顺序,并且还可以提高加工精度。与此同时,有研究基于能量理论对残余应力和加工变形的关系进行了研究。HEYMES 等^[9]指出,储存的弹性能释放是影响加工变形的主要因素。WANG 等^[10]采用有限元方法对航空发动机车削过程和钻孔过程进行分析,结果表明通过优化工艺顺序,工件内部的变形能或应变能在初始阶段迅速减小,在工艺结束时逐渐趋于稳定。

在整体构件加工中,残余应力对加工最终变形的影响已被广泛研究。此外,还必须考虑精加工过程中的变形变化。精加工阶段较大的变形变化,将无法满足最终零件的尺寸公差要求,并增加加工过程中的变形超差风险。在实际生产中,如果加工变形及其变化得不到充分的控制,零件批产的质量很难得到保证。因此,不仅要降低加工最终变形量,还需要对精加工阶段变形过程的变化进行控制,这样更有利于实现飞机整体零件的高性能加工。为了减小加工过程中变形波动,文章提出了一种加工变形稳定性的控制方法,通过优化材料去除顺序,可以使工件在粗加工阶段释放大量能量,从而减小精加工阶段的变形波动。

在实际生产中,长梁类飞机整体结构件的加工变形主要表现为弯曲变形。文章首先定义了与弯曲变形有关的加工变形稳定性和弯曲势能的概念,提出了一种优化材料去除顺序的方法,以实现加工变形的稳定性控制。最后,通过对实例进行研究,包括理论计算、有限元分析和试验验证等,证实了文中方法的有效性。

1 加工变形稳定性控制方法

1.1 加工变形稳定性

在铣削等加工过程中,加工变形随着材料的去除而变化,如图1所示,对于材料去除顺序A和材料去除顺序B,当只考虑内应力的影响时,它们变形的起点和终点大致相同^[11-12]。然而,2种加工顺序对应的变形的变化过程完全不同。加工变形稳定性代表了零件变形的波动变化程度,如果加工变形稳定性差,会造成很多不确定因素,影响形状精度和装配一致性。

在粗加工阶段,工件尺寸余量相对较多,有一定的容错空间。然而,在精加工阶段,必须保证零件能够加工到符合公差尺寸。控制精加工阶段的稳定性可降低最终零件超差的风险,并提高产品精

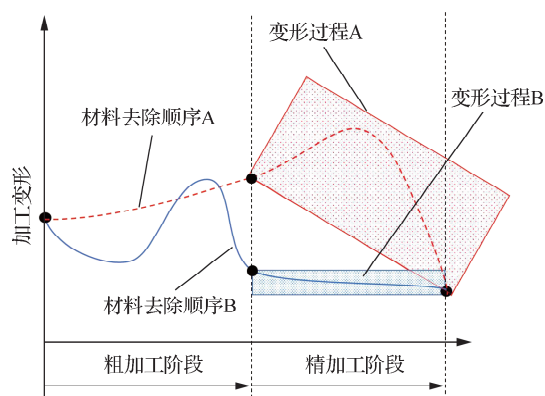


图1 加工变形稳定性示意图

Fig.1 Schematic diagram of processing deformation stability

度。因此,与控制整个加工过程的变形波动相比,控制精加工阶段的变形稳定性具有更大的意义。由图 1 可知,与加工顺序 A 相比,加工顺序 B 对应的加工变形变化过程更早趋于稳定。

假设从毛坯到最终零件包含 n 个工步,则精加工阶段的加工变形稳定性的量化评价值 (S) 定义为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-r+1} \sum_{i=r}^n (w_i - \bar{w})^2} \quad i = r, r+1, \dots, n \quad (1)$$

式中: i 为从工步 r 到工步 n 为精加工阶段; w_i 是第 i 步的工步变形量; \bar{w} 是整个阶段各个工步变形量的平均值。

1.2 弯曲势能

对于长梁类零件的弯曲变形,根据能量法^[10]可知

$$w^2 = \frac{E_b L^3}{32K} \quad (2)$$

式中: E_b 为材料含有的弯曲应变能, mJ; K 为材料截面的刚度, N/mm; L 为梁的长度, mm。

由式 (2) 可知变形值是弯曲应变能和截面刚度的函数。根据前期研究,弯曲应变能的演化对零件变形的变化起绝对主导作用,而不是刚度的演化^[12]。因此,在变形稳定性分析中,将优先考虑弯曲应变能的演变,基于能量在变形中起绝对主导作用,可以通过调整弯曲能量的演变来控制加工变形的稳定性。然而,剩余材料内部弯曲应变能的演变是复杂的,这与总应变能的单调下降不同。文章定义了一个区别于弯曲应变能的能量概念,即弯曲势能。弯曲势能量化了初始残余应力对最终零件弯曲变形的影响。

图 2 为长梁类零件弯曲势能定义示意图。将毛坯中除了最终部件外的所有材料在横截面上沿纵向分成 n 个单元,每个单元的最小宽度和高度分别等于切割宽度和切割深度。为了提高计算效率,单元的大小可以增加几倍。对于预拉伸的板材,不同轧制方向截面上的初始残余应力分布被认为是相同的,因此,单位长度等于零件长度。

P_k 为单元 k 包含的导致零件最终弯曲变形的弯曲势能。假设工件是绕 x 轴弯曲变形,则 P_k 可表示为

$$P_k = \frac{[\sigma'(k)A(k)(y(k)-Y)]^2 L}{2EI'} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: $A(k)$ 为单元 k 的横截面面积, mm^2 ; Y 为从最终零件质心到 x 轴的距离, mm; $y(k)$ 为从单元 k 的中心到 x 轴的距离, mm; E 为材料弹性模量, Pa; I' 为最终零件相对其自身形心的惯性矩, mm^4 ; $\sigma'(k)$ 为单元 k 内包含的等效应力, Pa。

等效应力可表示为

$$\sigma'(k) = \frac{\int_{A(k)} \sigma dA}{A(k)} \quad (4)$$

式中 σ 为初始残余应力, Pa。当只考虑沿轧制方向的应力 σ_r 时, $\sigma = \sigma_r$; 如果同时考虑横向应力 σ_t , 则 $\sigma = \sigma_r - \nu\sigma_t$, 其中 ν 为泊松比。

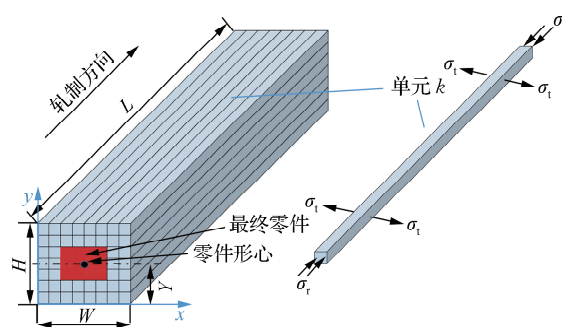


图 2 弯曲势能定义示意图

Fig.2 Definition of bending potential energy

1.3 控制流程

通过优化材料去除顺序,零件内部储存的应变能可以在加工初期得到充分的释放,有利于控制后续加工过程中的零件变形。基于弯曲势能的概念,如果在加工时优先去除具有高弯曲势能的单元,总弯曲势能将迅速减少,在随后的加工过程中,不会有太多的弯曲势能释放,也不会有大的零件变形。因此,零件变形减少,零件变形的波动得到有效降低,加工变形的稳定性得到提高。

根据变形稳定性控制原理,文章提出了一种基于材料去除顺序优化的加工变形稳定性控制方法,如图 3 所示。图 3 中算法的计算流程为:① 根据给定的初始残余应力分布和单元划分结果,计算各单元的弯曲势能,计算各单元的弯曲势能之和。② 定位查找当前加工工步所有可能的候选单元,计算所有可能单元对应的弯曲势能之和。③ 将所有备选单元中弯曲势能最小的单元添加到当前加工工步,从而更新工件形状。如果存在弯曲势能值相等的单元,则优先选择靠右边的单元。④ 重复步骤②~③,直到工件形状达到初始工件形状。最终得到的单元叠加顺序反过来就是优化的材料去除顺序。需要注意的是,优化过程的约束条件是只有当暴露在表面的材料去除后,才能去除内部材料,以免出现不合理的材料去除顺序。通过优化材料的去除顺序,零件内部的能量可以在加工的早期阶段得到充分释放,有利于控制加工过程的稳定性。

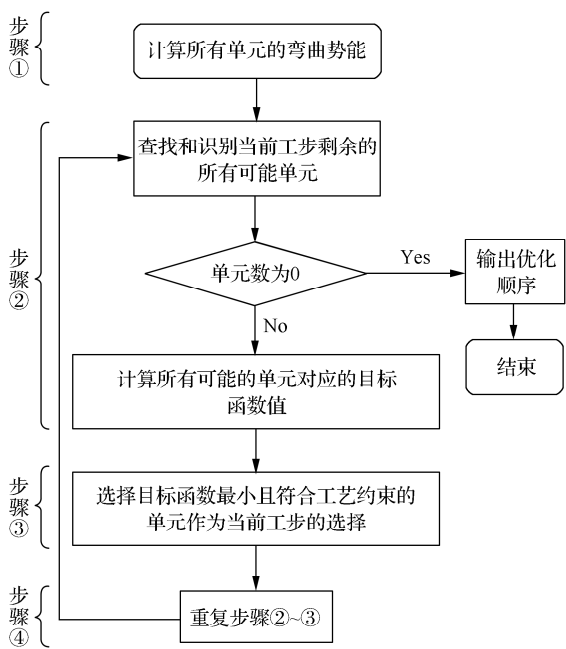


图 3 算法流程图

Fig.3 Flowchart of the algorithm

2 实例研究

2.1 零件形状

毛坯和零件形状如图 4 (a) 所示,毛坯材料是 7050-T74 铝合金预拉伸板,用裂纹柔度法测量初始残余应力分布^[13]。对于同一批次的毛坯,通过从毛坯的末端切割试样来测量初始残余应力分布,测得的毛坯初始残余应力分布曲线如图 4 (b) 所示。

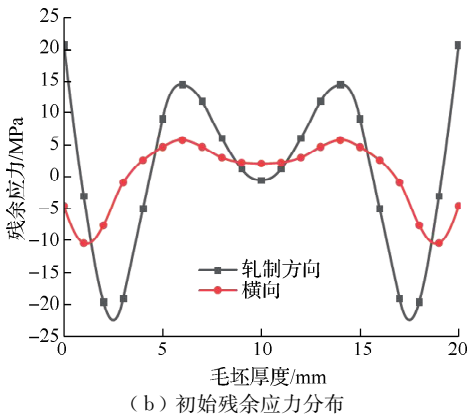
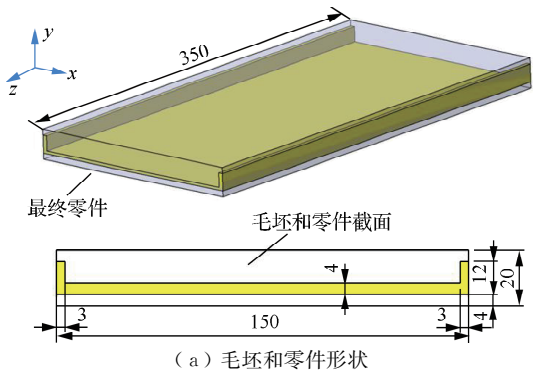


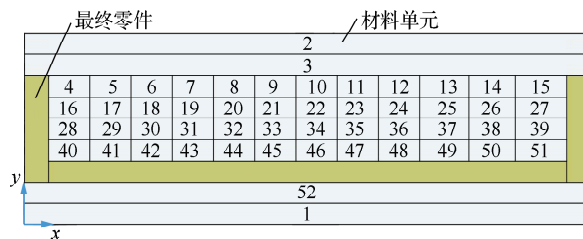
图 4 零件的几何形状和初始残余应力分布

Fig.4 Geometry of the part and initial residual stress distribution

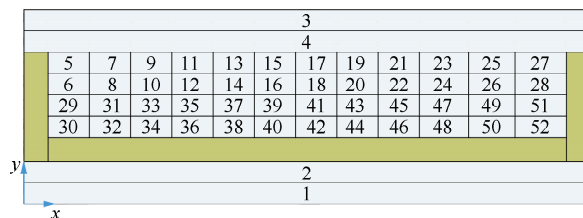
2.2 材料去除顺序优化

如图 5 所示，根据实际加工条件，将毛坯的横截面划分成 52 个单元。其中每个单元的高度等于切削深度，为 2 mm。为了提高计算效率，在靠近零件表面的每一层中只划分 1 个单元，所有单元的长度都是 350 mm，即零件长度。图 5 中的数字代表了单元的去除顺序，根据加工经验，将从第 28 步～第 52 步的加工阶段定义为精加工阶段。

计算得到各单元的弯曲势能值，并利用文中提出的优化方法，得到优化去除顺序，如图 5 (b) 所示。为了进行比较，同时选用图 5 (a) 中传统材料去除顺序进行对比分析。



(a) 传统去除顺序



(b) 优化去除顺序

图 5 2 种材料去除顺序

Fig.5 Schematic diagram of two material removal sequences

2.3 仿真和试验验证

有限元模拟 (FEM) 是分析各种机械加工过程中应力和变形的重要手段^[14]。针对图 5 中的 2 种材料去除顺序，采用有限元模拟仿真材料去除过程中的变形^[1-7]。仿真采用 ABAQUS 2017 软件进行。材料被定义为各向同性且均匀，弹性模量为 70.7 GPa，泊松比为 0.33。将测量得到的初始残余应力加载到有限元模型中，如图 6 所示。

在有限元分析中，采用“生死单元法”去除材料，与 2 种材料去除顺序相对应，材料去除的模拟过程也被设置为 52 个仿真步骤。仿真结果记录了每一步的变形值，并与理论分析和试验结果进行比较。

除了有限元仿真，文章还进行了加工试验来验证理论分析模型的有效性。文章设计了 2 组试验，分别对照图 5 中的 2 种加工顺序进行实际零件加工，其中每组试验重复 3 次，加工变形的结果取 3 次试验的平均值。在试验中，除了零件翻面，零件的基准面始终与工作台紧密接触，因此在加工试验时只测量了最终的变形量。

零件加工试验和变形测量如图 7 所示。零件实际加工试验在 VC-3016G 立式铣床上进行，如图

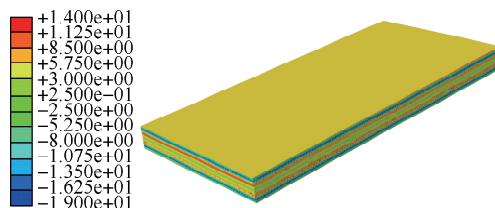
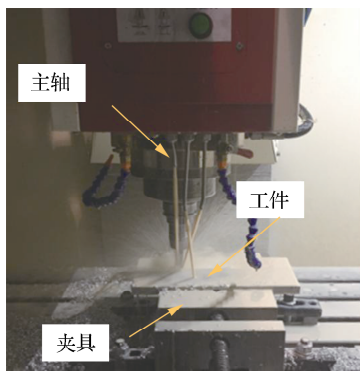
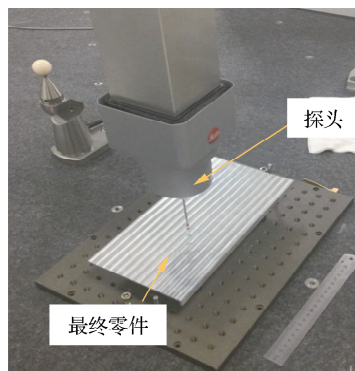


图 6 毛坯施加初始残余应力

Fig.6 Blank with initial residual stress applied



(a) 铣削过程



(b) 三坐标测量

图 7 加工试验和变形测量

Fig.7 Milling process and distortion measurement

7 (a) 所示。刀具采用硬质合金立铣刀。主轴转速为 18 000 r/min, 进给量为 7 000 mm/min, 切削宽度为 12 mm, 切削深度为 2 mm。所有工件均采用相同的切削参数。零件的最终形状用 MISTRAL 三坐标测量机 (CMM) 测量, 如图 7 (b) 所示, 测量机精度为 0.005 mm。在每次测量时, 测量零件底面上沿长度方向均匀分布的 20 个点, 拟合的曲线的最大挠度值为加工变形值。

3 结果和讨论

3.1 加工变形分析

图 8 显示了不同材料去除顺序对应的总弯曲势能的演变过程。结果显示, 与传统去除顺序相比, 优化的顺序对应的总弯曲势能在加工前期释放较快。

材料去除过程分为 52 个步骤, 每个步骤去除一个单元。由于工步繁多, 在加工试验中只测量了零件的最终变形结果。因此对于加工过程中每一工步, 采用仿真值和理论计算的变形值进行对比分析。图 9 显示了不同材料去除顺序对应的加工过程变形结果。如图 9 所示, 有限元分析结果与理论计算结果高度一致, 证明了理论分析模型的准确性。此外, 对于同样的毛坯内应力分布, 加工开始和结束时的加工变形值都是固定值。

对于最终的加工变形量, 将加工试验的最终变形结果与理论计算值和仿真结果进行了比较, 如图

10 所示。可以得到, 在 2 组试验中, 加工试验的测量结果与理论值和仿真值都较为吻合, 验证了分析模型和仿真模型的准确性。

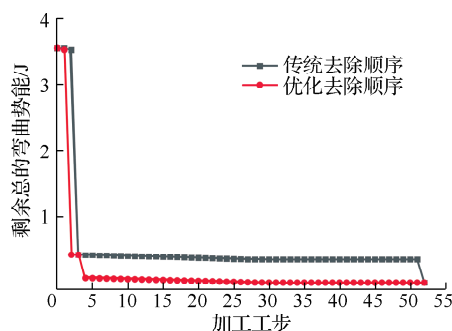


图 8 不同材料去除顺序的总弯曲势能变化

Fig.8 Change of total bending potential energy in different material removal sequences

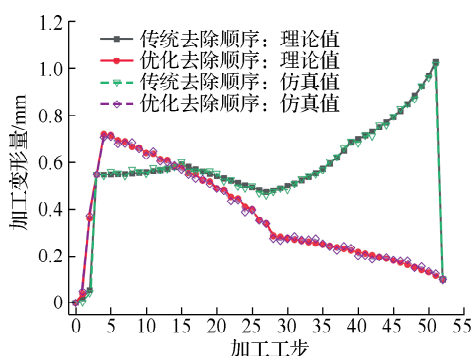


图 9 不同去除顺序对应的加工变形结果

Fig.9 Machining distortion results of two material removal sequences

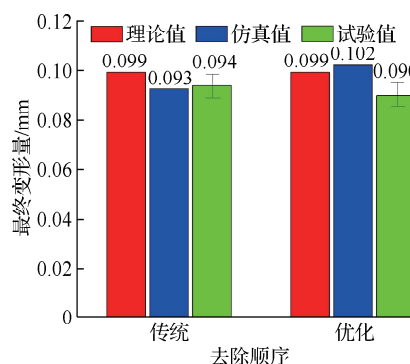


图 10 2 种材料去除顺序最终变形结果比较

Fig.10 Comparison of final distortion results of two material removal sequences

3.2 加工变形稳定性分析

2 种加工顺序对应的加工变形值在加工初期都有明显的波动。在加工后期, 传统加工顺序对应的变形值仍有较大波动, 而优化顺序对应的变形值和波动要小得多, 为了评估材料去除顺序优化对加工变形稳定性的影响, 分别计算传统顺序和优化顺序对应的精加工阶段变形稳定性评价。通过优化材

料去除顺序,精加工阶段的 S 值从 0.19 mm 变化到 0.05 mm。这表明通过优化材料去除顺序,精加工阶段的加工变形稳定性得到了显著提高。通过控制加工变形稳定性,减少了变形结果的不确定性,从而提高了最终批产零件精度和批次一致性。

4 结 论

文章对长梁类整体结构件加工变形稳定性控制进行了研究,提出了一种通过优化材料去除顺序来控制加工变形稳定性的方法,并设计 U 型梁缩比件,采用理论计算、数值模拟和加工试验结合的手段进行对比分析。结果表明,通过优化材料去除顺序,显著提高了长梁类整体结构件加工变形稳定性。

参考文献:

- [1] BEDEKAR V, VOOTHALURU R, BUNN J, et al. Measurement and prediction of through-section residual stresses in the manufacturing sequence of bearing components[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 57-60.
- [2] HUSSAIN A, LAZOGLU I. Distortion in milling of structural parts[J]. CIRP Annals, 2019, 68(1): 105-108.
- [3] BRINKSMEIER E, SÖLTER J, GROTE C. Distortion engineering-identification of causes for dimensional and form deviations of bearing rings[J]. CIRP Annals, 2007, 56(1): 109-112.
- [4] HUSSON R, DANTANJ Y, BAUDOUIN C, et al. Evaluation of process causes and influences of residual stress on gear distortion[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 551-554.
- [5] HEINZEL C, SÖLTER J, GULPAK M, et al. An analytical multilayer source stress approach for the modelling of material modifications in machining[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 531-534.
- [6] BRINKSMEIER E, SÖLTER J. Prediction of shape deviations in machining[J]. CIRP Annals, 2009, 58(1): 507-510.
- [7] LU L X, SUN J. Investigation on distortion mechanism and correcting load calculation method for aluminum beam structure by bilateral rolling process[J]. Procedia CIRP, 2016, 57: 781-786.
- [8] CERUTTI X, MOCELLIN K, HASSINI S, et al. Methodology for aluminium part machining quality improvement considering mechanical properties and process conditions[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2017, 18: 18-38.
- [9] HEYMES F, COMMET B, DU BOST B, et al. Development of new Al alloys for distortion free machined aluminium aircraft components[J]. ASM International, 1997, 3(1): 249-255.
- [10] WANG Z B, SUN J F, CHEN W Y, et al. Machining distortion of titanium alloys aero engine case based on the energy principles[J]. Metals, 2018, 8(6): 464.
- [11] BRINKSMEIER E, LÜBBEN T, FRITSCHING U, et al. Distortion minimization of disks for gear manufacture [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(4): 331-338.
- [12] YANG Y F, FAN L X, LI L, et al. Energy principle and material removal sequence optimization method in machining of aircraft monolithic parts[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(10): 2770-2781.
- [13] PRIMEM B, HILL M R. Residual stress, stress relief, and inhomogeneity in aluminum plate[J]. Scripta Materialia, 2002, 46(1): 77-82.
- [14] 魏坤霞, 马志俊, 魏伟, 等. 纯铝 T 型等通道变形有限元模拟研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2016, 28(6): 68-72.

(责任编辑:谭晓荷)