

微铣削高温合金 GH4169 表面残余应力分析与预测优化

马世玲,董长双

太原理工大学

摘要: 运用 ABAQUS 有限元软件对硬质合金立铣刀微铣削高温合金 GH4169 进行仿真,建立了三维微铣削有限元模型,分析了主轴转速、每齿进给量、轴向切削深度的改变对工件逆铣侧面残余应力的影响。分析结果表明:工件表面残余应力随着主轴转速的增大而增大;因刀刃半径的存在和尺寸效应的作用,残余应力随每齿进给量的增大先增大后减小;残余应力随铣削深度的增大而增大。最后运用神经网络群遗传算法以最小残余应力为目标对残余应力进行了预测和切削参数优化,得到了基于最小残余应力的最佳切削用量组合。

关键词: 高温合金;有限元仿真;微铣削;残余应力

中图分类号: TG115 + 6. 3;TG54;TP391. 9

文献标志码: A

Analysis Prediction and Optimization of Surface Residual Stress in Micro-milling Superalloy GH4169

Ma Shiling, Dong Changshuang

Abstract: The finite element model of micro-milling superalloy GH4169 with carbide end mills is established with ABAQUS software, and the effects of the spindle speed, axial cutting depth and feed per tooth on the residual stress of the workpiece are analyzed. The results show that the residual stress of the workpiece increases with the increase of the spindle speed, and due to the existence of the edge radius and the size effect, the residual stress increases first and then decreases with the increase of the feed per tooth, and the stress increases with the increase of the milling depth. Finally, the neural network group genetic algorithm is used to predict and optimize the cutting parameters with the minimum residual stress as the target, and the optimal cutting parameter combination is obtained.

Keywords: superalloy; finite element simulation; micro-milling; residual stress

1 引言

微铣削加工中,当刀刃半径小于切削厚度时,会出现最小切厚问题。镍基高温合金属于典型难切削材料,已加工表面的残余应力关系着工件的疲劳特性、表面加工质量和工件尺寸稳定性,因此,有必要对微铣削加工高温合金进行研究。

Fei Wang 等^[1]利用 DEFORM-3D 软件建立微铣削模型,采用单因素法研究了每齿进给量和切削深度对最小切屑未变形厚度和切削力的影响;T. Özel 等^[2]进行了细粒无涂层和 CBN 涂层刀具微铣削的试验研究和有限元模拟,观察了有无刀具涂层对表面粗糙度、毛刺和刀具磨损的影响;F. Cus 等^[3]用神经网络预测切削力和用粒子群算法得到基于最小切削力的高速端铣的切削参数;张欣欣等^[4]以表面粗糙度为目标,通过试验获得加工钛合金和不锈钢的优化切削参数;刘宇等^[5]运用三维仿真,用不同刀刃半径的微铣刀对铝合金进行槽铣,获取仿真切削力,并通过理论计算验证了仿真的准确性,但此研究

没有考虑切削参数的改变对切削力的影响;Xiao-hong Lu 等^[6]借助 ABAQUS 软件建立微铣削模型,研究了每齿进给量对工件水平进给和垂直进给两个方向的底面残余应力的影响;唐东红等^[7]用耦合神经网络和遗传算法实现了减小工件变形量的控制。综上所述,目前的研究主要集中在宏观切削领域,微铣削方面也主要研究切削力,而对微铣中残余应力的研究较少。

由于微铣削的侧面残余应力难以测量,且逆铣的侧面残余应力较顺铣时的侧面和底面残余应力大,本文基于 ABAQUS 软件建立微铣削 GH4169 高温合金的三维有限元仿真模型,探究铣削速度、铣削深度、每齿进给量对逆铣侧面残余应力的影响。以最小表面残余应力为目标,建立神经网络预测模型,并用遗传算法对切削参数进行优化。

2 建立微铣削模型

(1) 本构模型

高温合金微铣削的过程是大变形、大应变的过程,应变为弹塑性应变,且常伴随着高温。Johnson-

cook(简称 J-C)本构模型能够较好地表达高温合金的粘塑性特性。J-C 模型关系式^[8]可表示为

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中, A 为初始屈服应力; B 为硬化系数; C 为应变率系数; m 为温度软化系数; n 为加工硬化指数; $\bar{\sigma}$ 为等效塑性应力; $\bar{\epsilon}$ 为等效塑性应变; $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; T_{melt} 为材料熔点; T_0 为初始温度(取 20℃)。

J-C 本构模型参数取值如表 1 所示。

表 1 GH4169 本构模型参数

材料	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
GH4169	450	1700	0.6	0.017	1.3

(2) 剪切失效模型

与 J-C 本构模型配合的 J-C 剪切失效模型能很好地模拟大变形、大应变下的金属变形失效,如切屑分离。J-C 剪切失效模型破坏参数有

$$D = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \right) \quad (2)$$

式中, D 为单元积分点的等效塑性应变与临界等效塑性应变的比值; $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ 为单元积分节点的等效塑性应变; $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 为临界等效塑性应变。

$\bar{\epsilon}_f^{pl}$ 的公式为

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{p}{q}) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\bar{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left(1 + d_5 \frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right) \quad (3)$$

$d_1 - d_5$ 取值如表 2 所示。

表 2 $d_1 - d_5$ 的取值范围

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
0.239	0.456	-0.3	0.07	2.5

(3) 摩擦模型

切削加工过程中,存在刀具前刀面与切屑的接触和刀具后刀面与已加工工件表面的接触,接触类型既有滑动摩擦也有黏着摩擦,因此应用库伦摩擦公式建立刀具与工件的接触模型。工件材料 GH4169 的物理和力学性能参数如表 3 所示。

表 3 GH4169 材料的物理和力学性能参数

物理性能	密度 (kg/m ³)	泊松比	热导率 (W/m·K)	比热容 (J/kg·℃)	弹性模量 (GPa)
		8240	0.3	14.7	435
力学性能	延伸率 (%)	断面收缩率 (%)	抗拉强度 (GPa)	冲击韧性 (MJ/m ²)	屈服强度 (GPa)
	24	40	1430	348	1110

库伦摩擦公式为

$$\tau = \begin{cases} \mu \sigma_n & \tau < \tau_{max} \text{ (滑动区)} \\ \tau_{max}, \tau & \tau \geq \tau_{max} \text{ (粘着区)} \end{cases} \quad (4)$$

(4) 三维铣削模型

工件尺寸为 1mm × 0.8mm × 0.4mm。刀具为硬质合金微铣刀,刃数 2,直径 0.6mm,前角 10°,后角为 6°,螺旋角 30°。采用 SolidWorks 软件建立刀具三维模型如图 1 所示,截取长度为 0.2mm 并导入到 ABAQUS 中。将刀具设置为离散刚体,网格类型为 C3D10M。由于工件形状简单,在 ABAQUS 中建立模型,并设置为变形体。

工件上层的网格为密化网格类型 CPE4RT(见图 2)。依次添加约束(见图 3a)、铣槽(见图 3b)、退刀(见图 3c)和释放约束分析步(见图 3d)。完成上述步骤后在工件逆铣侧的侧面随机取 20 个点,提取其进给方向的残余应力并取平均值。

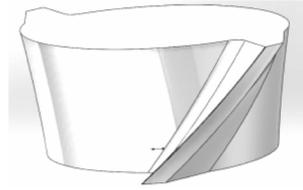


图 1 刀具模型

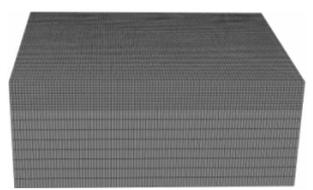
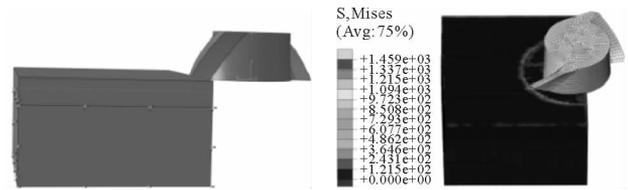
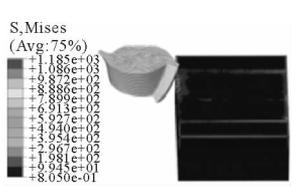


图 2 工件网格化模型

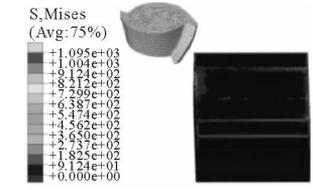


(a)

(b)



(c)



(d)

图 3 微铣削仿真各个阶段

3 表面残余应力影响因素

(1) 切削速度

采用单因素法分析切削速度与工件表面残余应力的关系,每齿进给量和轴向切削深度取定值。取 5 组不同转速,随着主轴转速的增加,表面残余应力的变化如图 4 所示。

由图 4 可知:残余应力呈现为压应力;随着主轴转速的增加,表面残余压应力呈增大趋势。这是因为随着切削速度的增加,工件表面的塑性变形增大,引起残余压应力的增大。

(2) 进给量

采用单因素法分析进给量与工件表面残余应力

的关系,转速和切削深度取定值。设置5组不同的进给量,随着每齿进给量的增加,表面残余应力的变化如图5所示。

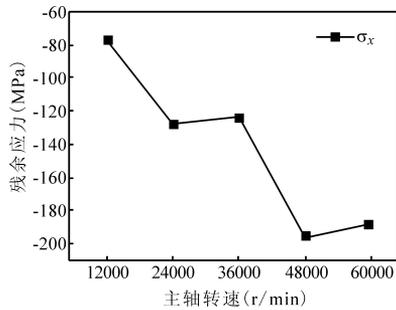


图4 主轴转速对工件表面残余应力的影响

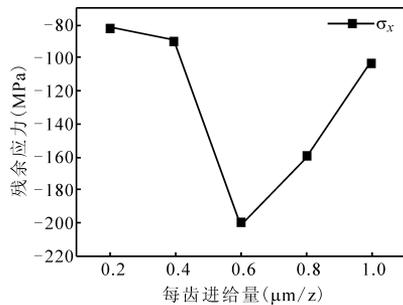


图5 每齿进给量对工件表面残余应力的影响

由图5可知:随着每齿进给量的增加,残余应力呈现先增大后减小的趋势;当每齿进给量从0.2μm增加到0.6μm时,由于存在刀尖圆弧半径,刀尖圆弧对工件表面的挤压作用增大,使得工件表面的残余应力急剧增大;当每齿进给量从0.6μm增加到1.0μm时,挤压作用减弱,切削过程由挤压变形逐渐转为剪切断裂,残余应力呈减小趋势。

(3) 切削深度

采用单因素法分析轴向切削深度与残余应力的关系,主轴转速和每齿进给量取定值。设置5组不同的轴向切削深度进行仿真,随着切削深度的增加,残余应力的变化见图6。由图可知,随着切削深度的增加,工件表面残余应力呈现较缓增加的趋势。

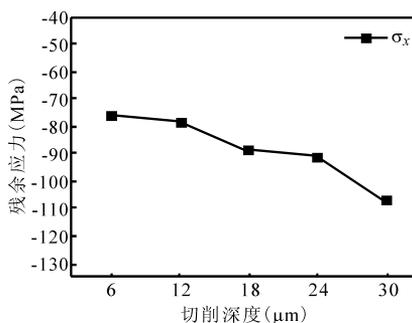


图6 切削深度对表面残余应力的影响

4 预测模型的建立与优化

(1) 预测优化模型

由于切削参数与残余应力之间存在非线性关系,很难用与试验结果相吻合的理论公式来表示。鉴于神经网络的非线性拟合能力强,而遗传算法在非线性的极值寻优方面比较出色,本文运用神经网络将切削参数(主轴转速、每齿进给量、轴向切削深度)作为自变量,把工件表面残余应力作为因变量进行数据拟合。将训练后的神经网络预测值作为个体适应度值,用遗传算法寻找最优值和对应切削参数^[9],算法流程如图7所示。

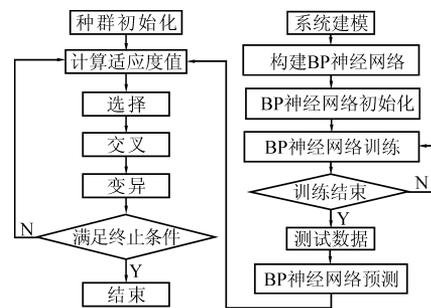


图7 神经网络—遗传算法流程

以切削参数为自变量,工件表面残余应力为因变量,故神经网络的输入层是3,输出层是1,隐含层定为5。网络拓扑结构如图8所示。为了得到神经网络训练所需要的样本数据,在主轴转速的取值范围 $1200\text{r/min} < n < 6000\text{r/min}$ 、每齿进给量的取值范围 $0.1\mu\text{m} < f_z < 1\mu\text{m}$ 、轴向切削深度的取值范围 $0 < a_p < 30\mu\text{m}$ 内用均匀设计法取48组参数组合,通过仿真试验获得残余应力数值。用MATLAB软件将48组数据作为BP神经网络训练样本输入。

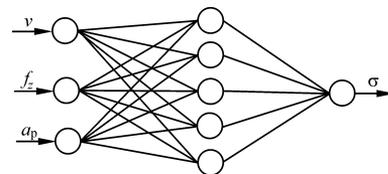


图8 残余应力预测的神经网络拓扑结构

隐含层的激励函数和归一化函数分别为

$$f(x) = (1 + e^{-x})^{-1} \quad (5)$$

$$y = (y_{\max} - y_{\min}) \times \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + y_{\min} \quad (6)$$

训练算法为Levenberg-Marquardt算法。学习率取0.1,目标误差取0.1。对于遗传算法,交叉概率为0.5,变异概率为0.1。

(2) 预测优化结果

保存神经网络预测模型,将三次单因素仿真的

切削参数输入预测模型后可以得到神经网络预测结果。预测结果与仿真结果对比如图 9 - 图 11 所示。

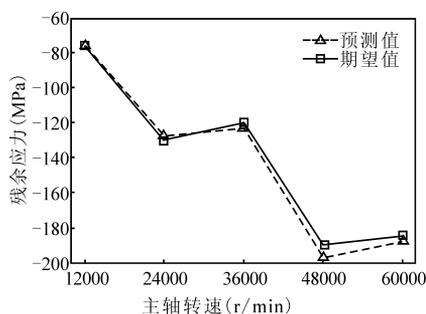


图 9 主轴转速为变量时残余应力预测值与仿真值的对比

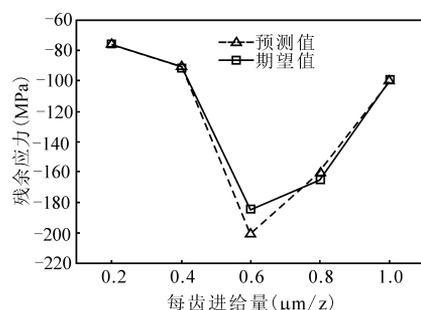


图 10 每齿进给量为变量时残余应力预测值与仿真值的对比

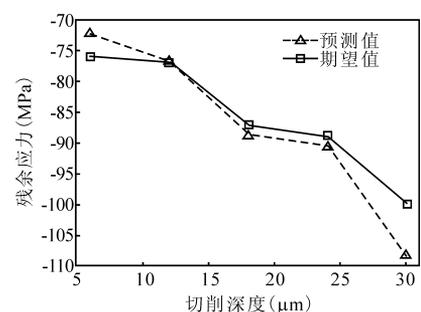


图 11 轴向切削深度为变量时残余应力预测值与仿真值的对比

从图 9 - 图 11 可知:预测趋势与试验结果能较好地吻合,最大差值为 15.8MPa,最大误差为 7.8%;用遗传算法求得的最优主轴转速为 1325r/min,每齿进给量为 0.9 $\mu\text{m}/\text{z}$,切削深度为 6 μm ,所对应的进给方向残余应力为 -75.29MPa。通过仿真测得进给方向的残余应力为 -72.43MPa,误差为 3.9%,证明该优化方法可行。

5 结语

本文建立了高温合金 GH4169 三维微铣削模型,分析了主轴转速、每齿进给量和轴向切削深度的改变对微铣削逆铣侧面残余应力的影响,可知:

工件逆铣侧的残余应力为压应力,切削速度、每齿进给量和切削深度的变化都会使残余应力发生改变,切削速度和切削深度与残余应力的大小大致呈

线性关系。由于存在尺寸效应,因此每齿进给量与残余应力的关系呈现先增大后减小的趋势。

将神经网络和遗传算法的优势相结合,可以预测用不同切削参数进行切削后工件表面的残余应力,并用遗传算法找出残余应力最小时所对应的切削参数,证明了采用神经网络遗传算法优化的可行性。

参考文献

- [1] Fei Wang, Xiang Cheng, Yuanyong Liu, et al. Micromilling simulation for the hard-to-cut material [J]. Science Direct, 2017, 174: 693 - 699.
 - [2] T. Özel, T. Thepsonthi, D. Uluhan, et al. Experiments and finite element simulations on micro-milling of Ti6Al4V alloy with uncoated and CBN coated micro-tools [J]. CIRP-Annals Manufacturing Technology, 2011, 60: 85 - 88.
 - [3] F. Cus, U. Zuperl, V. Gecevska. High speed end-milling optimisation using particle swarm intelligence [J]. Journal of achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, 22(2): 75 - 78.
 - [4] 张欣欣, 许金凯, 于化东. 高速微铣削难加工材料切削参数优化试验研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(8): 19 - 23.
 - [5] 刘宇, 别海楠. 6061 铝合金微铣削切削力仿真与预测 [J]. 工具技术, 2016, 50(2): 29 - 35.
 - [6] Xiaohong Lu, Yanjun Lu, Furui Wang, et al. Research on surface residual stress of micromilling nickel-based superalloy inconel 718 [J]. Int. J. Nanomanufacturing, 2016, 12(1): 82 - 92.
 - [7] 唐东红, 孙厚芳. 基于工件变形控制的铣削参数优化方法研究 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(9): 1076 - 1078.
 - [8] 许小进. 镍基高温合金 Inconel718 正交切削多尺度仿真 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
 - [9] 王小川, 史峰, 郁磊, 等. MATLAB 神经网络 43 个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.
- 第一作者: 马世玲, 硕士研究生, 太原理工大学机械工程学院, 030024 太原市
First Author: Ma Shiling, Postgraduate, College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China
- 通信作者: 董长双, 副教授, 太原理工大学机械工程学院, 030024 太原市
Corresponding Author: Dong Changshuang, Associate Professor, College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China