

基于有限元法的钛合金铣削力预测模型研究

刘德, 焉嵩, 张素燕, 刘彩军, 赵亚萌, 李志新

首都航天机械有限公司

摘要: 利用 ABAQUS 对钛合金材料铣削过程进行有限元分析, 得到铣削力数据。在相同工艺参数条件下进行钛合金铣削试验, 通过仿真切削力与试验测得切削力对比, 验证了有限元模型的准确性。以每齿进给量为单因素变量, 得到了不同每齿进给量下的铣削力, 为钛合金铣削加工中工艺参数的选择提供参考。

关键词: 钛合金; 铣削力; 有限元法

中图分类号: TG75; TH162

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2020.10.016

Study on Prediction Model of Milling Force of Titanium Alloy Based on Finite Element Method

Liu De, Yan Song, Zhang Suyan, Liu Caijun, Zhao Yameng, Li Zhixin

Abstract: The finite element analysis of milling process of titanium alloy material is carried out by ABAQUS, and the milling force data is obtained. Then the milling force test is carried out under the same parameter condition, and the reliability of the FEM model is verified by comparing the simulated milling force with the measured milling force. The milling forces are obtained by taking the feed per tooth as a single factor variable, providing a reference for the selection of process parameters in titanium alloy milling process.

Keywords: titanium alloy; milling force; finite element method

1 引言

钛合金材料的弹性模量小, 会增大切削加工过程中的变形量, 加剧刀具磨损; 其热传导系数低, 在切削过程中热量得不到及时释放, 对刀具和工件都会产生不利影响。铣削力是计算铣削功率、选择工艺参数和机床类型等的重要依据。因此, 建立一种有效的钛合金铣削力预测模型, 在加工前得到其大致铣削力数值, 对于合理选择加工参数和提高零件加工质量都具有重要意义。

近年来, 国内外众多学者对铣削力预测模型进行了大量研究, 提出了众多的铣削力预测模型, 主要分为多元回归分析预测模型、微元铣削力预测模型、有限元预测模型和神经网络预测模型四类^[1]。其中, 有限元预测模型因能够对铣削整体过程进行分析, 同时还能得到切削温度、等效应变和残余应力等数值, 所以近年来应用最为普遍。王明海等^[2]在 ABAQUS 软件中以 Ti6Al4V 为工件材料, 建立了接近实际铣削加工的有限元模型, 成功模拟了切屑形态、应力和温度等, 并应用所建模型模拟了不同铣削速度时的铣削力, 通过试验对比验证了模型有效性。岳彩旭等^[3]通过 ABAQUS 软件建立了钛合金铣削

过程仿真模型, 以铣削力和温度为评价指标, 采用单因素和正交法分析了刀具几何角度对铣削力和铣削温度的影响规律, 并对铣削力仿真结果进行了试验验证。张卫华等^[4]利用 ABAQUS 软件建立了钛合金三维铣削有限元模型并进行相应仿真分析, 获取和分析了不同切削条件下的铣削温度场和铣削力波形。

本文以航天产品某型号钛合金材料零件为研究对象, 选取精铣过程进行分析, 在 ABAQUS 软件中建立三维铣削模型, 通过设置每齿进给量为单因素变量, 研究了每齿进给量对铣削力的影响, 为钛合金铣加工中工艺参数的选择提供参考。

2 切削仿真理论

2.1 材料本构模型

金属切削过程实际上是金属在刀具作用下逐渐经历弹性-塑性-损伤失效阶段的过程。弹性本构模型基于胡克定律, 切削仿真中需要重点分析塑性本构模型。常用的塑性本构模型有 Johnson-Cook 模型、Zerilli-Armstrong 模型、Bodner-Paton 模型等。其中, Johnson-Cook 模型能反映材料流动应力与应变、应变率和温度的关系, 并且各相关参数可由力学试验得到, 所以该模型在切削仿真中应用最广泛。Johnson-Cook 本构模型表示为

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

式中, σ 为材料流动应力; A, B, n, C, m 为 Johnson-Cook 塑性本构参数; ε^p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; T 为温度; T_0 为室温; T_{melt} 为材料熔点温度。

本文选用的 J-C 参数如表 1 所示^[3]。

表 1 钛合金 J-C 本构参数

A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	$\dot{\varepsilon}_0$	T_{melt} (°C)	T_0 (°C)
875	793	0.01	0.386	0.71	1	1286	25

2.2 材料断裂准则

材料断裂准则对应材料变形过程中的损伤失效阶段,在实际切削过程中即为切屑生成的过程。材料的断裂准则可分为几何准则和物理准则两类。几何准则的判断依据是刀尖到刀尖前单元节点的距离,当该距离小于某个临界值时,单元发生断裂;物理准则的判断依据是刀尖前单元节点的应力、应变及应变能等物理量,当该物理量超过某个临界值时,单元发生断裂。

由于材料塑性参数选用 J-C 本构参数,所以使用 Johnson-Cook 剪切失效准则作为切屑断裂准则。该准则的失效参数表达式为

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon^p}{\varepsilon^{p\text{f}}} \quad (2)$$

式中, $\Delta \varepsilon^p$ 为等效塑性应变增量; $\varepsilon^{p\text{f}}$ 为失效时的等效应变。当 $D = 1$ 时,单元失效。

$\varepsilon^{p\text{f}}$ 的值由材料特性决定,其表达式为

$$\varepsilon^{p\text{f}} = \left(D_1 + D_2 \exp D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma} \right) - \left(1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \times \left[1 - D_5 \left(\frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 为材料失效常数; σ_m 为静水压力; σ 为 Von Mises 应力。

本文选用的失效参数如表 2 所示^[3]。

表 2 钛合金 Johnson-Cook 失效参数

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
-0.09	0.25	-0.5	0.014	3.87

3 切削仿真过程及分析

3.1 仿真过程

图 1 为建立的钛合金三维铣削模型。钛合金工件尺寸 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 6.5\text{mm}$, 材料为 Ti6Al4V。铣刀参数为:直径 $d = 20\text{mm}$,螺旋角 $\beta = 30^\circ$,前角 $\gamma =$

10° ,后角 $\alpha = 10^\circ$,齿数为 2。加工参数为:切削速度 600r/min ,切削深度 6mm ,切削宽度 0.5mm ,每齿进给量为 0.1mm 。顺铣,不使用切削液,设置求解时间 0.007s 。

为了提高计算机求解效率,仅选取一小段用于切削的铣刀部分作为刀具模型,同时,针对工件模型中的切屑部分进行局部网格加密,最小网格尺寸为 0.02mm 。由于可以忽略铣刀在加工过程中的变形量,将铣刀模型设置为刚体,并选取铣刀轴线上一点作为参考点,用于铣刀运动载荷的施加及后续切削力的提取分析。对工件模型底部施加固定约束,并对刀具施加沿刀轴方向的旋转和沿进给方向的平移两个速度,约束其余自由度。将刀具面与工件切屑层全部节点集作为主副接触面,建立接触,并导入 ABAQUS/explicit 显式求解器进行求解。

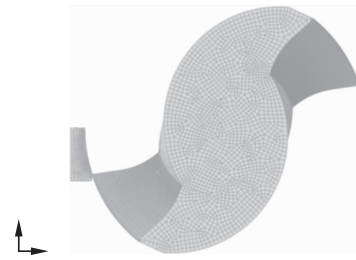


图 1 三维铣削仿真模型

3.2 仿真分析

求解完成后仿真结果如图 2 所示。可见,随着切削的进行,钛合金材料的切削层部分与基体发生了分离,形成切屑。在时间历程中选择刀具刚体参考点处的支反力进行分析,得到铣削过程中的切削力曲线(见图 3)。

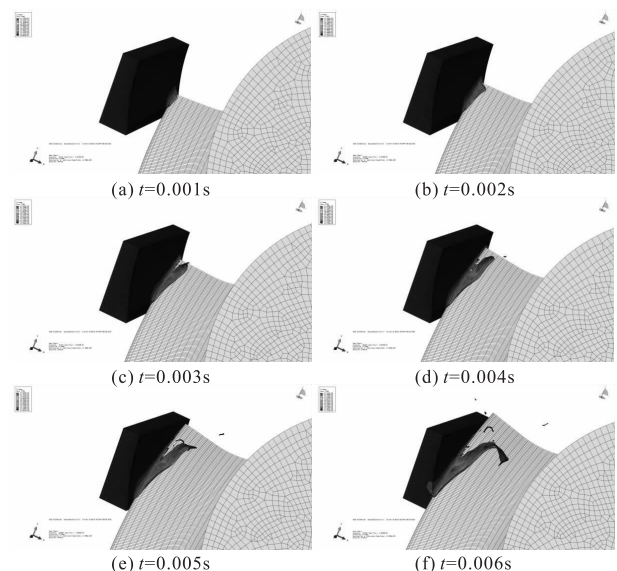


图 2 仿真中切屑形成

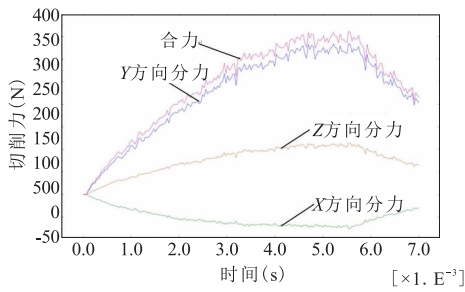


图3 仿真得到的切削力曲线

由切削力曲线可以看出,随着铣削过程的进行,铣刀切削刃逐渐切入工件,三个方向的铣削力数值均开始增大。当 $t \approx 0.0045s$ 时,由于此时铣刀与切屑表面接触面积最大,三向铣削力数值也达到最大值。其中,X方向分力最大约为 80N,Y方向分力最大约为 320N,Z方向分力最大约为 110N,合力最大约为 350N。铣削力曲线出现很多波动,考虑为切削仿真过程中不断有工件网格发生失效,造成铣削力的小幅升高与下降。

4 切削试验验证

仿真完成后,为验证仿真结果的准确性,选取钛合金工件进行了实际铣削试验。试验机床为某进口五轴加工中心,试验刀具为 $\Phi 20$ 硬质合金刀具,试验过程中的切削参数与仿真中保持一致,使用 Kistler9257B 三向测力仪进行铣削力的测量。试验时现场照片如图 4 所示。

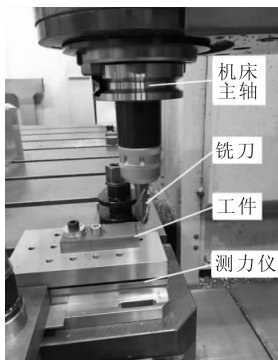


图4 铣削试验现场

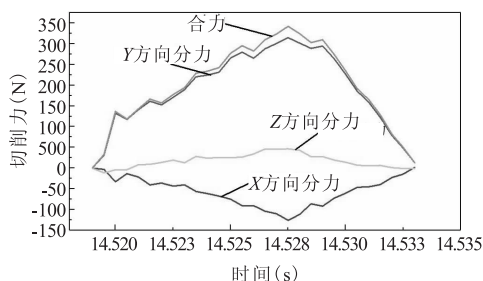


图5 试验测得的铣削力曲线

在测力仪配套软件 Dynoware 中查看切削力,并导出到 Origin 中进行数据处理。选择稳定切削状态下的单个铣刀刃切削过程绘制铣削力曲线,如图 5 所示。

对比图 3 和图 5 可以发现,仿真所得铣削力曲线与实际测得铣削力曲线在曲线走势上一致,随着单个刀齿的切入均呈现先增大再减小的趋势。并且,仿真所得三个方向的铣削分力以及合力在数值上也与试验数据有较好的一致性,其数值比对情况见表 3。

表3 仿真铣削力与试验铣削力对比

项目	仿真铣削力(N)	试验铣削力(N)	偏差数值(N)	偏差百分比(%)
X方向分力	80	110	30	37.5
Y方向分力	320	310	10	3.1
Z方向分力	110	50	60	54.5
合力	350	340	10	2.9

对比分析可见,仿真铣削力和试验铣削力在铣削力合力和 Y 方向分力上较为接近,偏差分别为 2.9% 和 3.1%;在 X 方向分力上,偏差为 37.5%;在 Z 方向分力上偏差最大,达到了 54.5%。考虑到 Z 方向分力试验测得数据仅为 50N,其数值偏差为 60N,相对于铣削合力来说只占很小一部分,所以认为其偏差值可以接受。分析 Z 方向分力偏差较大的原因为,真实的铣削过程为多因素影响的复杂非线性过程,而有限元分析基于很多理想化条件,同时为了提高求解效率,对很多细节进行了简化,从而引起误差。

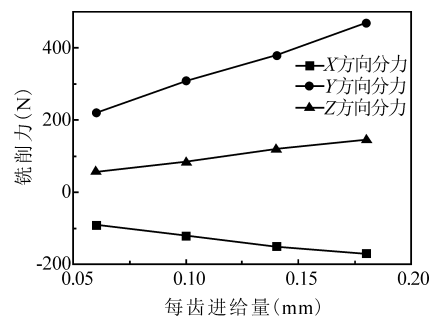


图6 每齿进给量对铣削力的影响

5 每齿进给量对铣削力的影响

通过仿真和试验测得铣削力进行对比,验证了有限元模型预测铣削力方面的可靠性。选取工艺参数中的每齿进给量作为单因素变量,数值分别为 0.06mm,0.1mm,0.14mm,0.18mm,其他参数不变,进行了另外三次仿真分析,得到了铣削力数值,如图 6 所示。由图可见,随着每齿进给量的增大,三向铣

裂纹位置对焊接接头结构力学行为的影响

孙剑伟¹, 孙建国², 王帅³

¹西安航空职业技术学院; ²北京航空航天大学; ³西安科技大学

摘要: 借助有限元数值模拟方法分析了不同界面位置处应力腐蚀裂纹裂尖力学特性。结果表明:堆焊层是容易失效的薄弱部位;当界面位置施加载荷超过工作载荷时,裂尖应力反而随载荷的增加而降低,这与材料内部的加工硬化有关;其结构完整性的准确分析和评定对保障核电设备的安全可靠性具有重要意义。

关键词: 异种金属焊接接头;应力;应变;有限元

中图分类号: TG407;TH161;O346.1 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2020.10.017

Effect of Crack Location on Mechanical Behavior of Welded Joints

Sun Jianwei, Sun Jianguo, Wang Shuai

Abstract: The mechanical properties of stress corrosion crack tip at different interface locations are analyzed by means of finite element numerical simulation. The results show that the surfacing layer is a weak part that is easy to fail. When the applied load exceeds the working load at the interface position, the crack tip stress decreases with the increasing of the load, which is related to the work hardening inside the material and the accurate analysis and evaluation of its structural integrity is of great significance to ensure the safety and reliability of nuclear power equipment.

Keywords: dissimilar metal welds; stress; strain; finite element

1 引言

安全端焊接接头在制备过程中,由于工艺性原因,内部存在力学性能不均匀性,在核电高温高压环境以及内部力学性能不均匀情况下,焊接过程产生的接头内部缺陷会导致应力腐蚀开裂现象,这种应力腐蚀开裂是影响安全端焊接接头寿命的主要原因。轻水堆安全端焊接接头作为核电回路的关键部

件,其使用寿命严重影响核电站的安全平稳运行,因此研究轻水堆核电站由使用环境因素引起的开裂现象至关重要。

焊接接头裂纹作为内部如夹杂、气孔的表现形式,是研究应力腐蚀开裂的重要手段。核电安全端焊接过程中裂纹有可能出现在焊材、母材、堆焊层内部以及界面相交处,界面处的裂纹可以细化分为界面靠近焊材处和界面靠近母材处等。

由于接头不同位置处的力学性能存在差异性,因此研究不同位置的裂纹扩展现象非常必要。本文主要研究了界面处不同位置的裂纹扩展行为,为异

收稿日期: 陕西省教育厅一般专项科学研究计划(20JK0701)
收稿日期: 2019年7月

削力均呈线性增长趋势。

6 结语

(1)在 ABAQUS 软件中建立钛合金三维铣削的有限元模型,模拟得到了切屑形态和切削力数值;

(2)通过相同参数条件下的铣削试验,将仿真与试验所得铣削力进行对比,验证了有限元模型预测铣削力方面的可靠性;

(3)基于前述有限元模型,选择每齿进给量为单因素变量进行多次仿真分析,得到了不同每齿进给量下的切削力情况。结果表明,随着每齿进给量的增大,铣削力近乎呈线性增长,为钛合金零件的铣削加工工艺参数的选择提供了一定参考。

参考文献

- [1] 赵凯,刘战强. 铣削力预测方法和影响因素综述[J]. 机械科学与技术,2015,34(8):1190-1200.
- [2] 王明海,李世永,王京刚,等. 航空钛合金 Ti6Al4V 的三维铣削加工有限元仿真[J]. 机械科学与技术,2014,33(7):1036-1039.
- [3] 岳彩旭,刘鑫,何耿焯,等. 钛合金薄壁件铣削过程有限元仿真分析[J]. 航空制造技术,2019,62(13):60-66.
- [4] 张卫华,刘争,张亮. 高效加工 TC4 钛合金的铣削过程数值模拟[J]. 工具技术,2019,53(2):104-107.

第一作者:刘德,助理工程师,首都航天机械有限公司,100076 北京市

First Author: Liu De, Assistant Engineer, Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China