

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.04.008

基于 ABAQUS 的高温合金 GH4169 切削力仿真研究

王 智^{1,2}, 吕彦明^{1,2}

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122;
2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘 要:为了研究镍基高温合金加工中切削用量对切削力的影响,课题组借助高温合金的材料本构模型、失效准则、切削过程中的切屑分离准则和摩擦模型,利用 ABAQUS 有限元分析软件建立了镍基高温合金的二维切削仿真模型,分别以切削速度、切削深度和进给量为单一变量,探究切削力的变化规律。结果表明:切削力随切削速度的增加而减小,并趋于稳定状态;切削力随着进给量和切削深度的增大而增大;相较于切削速度,进给量和切削深度对切削力的影响更大。

关 键 词:高温合金 GH4169;本构模型;失效准则;切屑分离准则;有限元模拟;切削用量

中图分类号: TG506; TH161 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2019)04-0042-04

Cutting Force Simulation of Superalloy GH4169 Based on ABAQUS

WANG Zhi^{1,2}, LÜ Yanming^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to study the effect of cutting parameter of nickel-based superalloy on cutting force, a two-dimensional cutting simulation model of nickel-base superalloy was established by finite element analysis software ABAQUS, with the help of the constitutive model of the superalloy, the failure criterion, the chip separation criterion and the friction model during the cutting process. The effect of cutting speed, cutting depth and feed rate on cutting force were investigated. The result show that cutting force decreases with increasing cutting speed and tends to be stable; On the contrary, cutting force increases with increasing cutting feed and cutting depth. In general, the influence of cutting feed and cutting depth on cutting force is greater than cutting speed.

Keywords: superalloy GH4169; constitutive model; failure criterion; chip separation criterion; finite element simulation; cutting parameter

GH4169 作为一种应用十分广泛的镍基高温合金,因其良好的抗氧化性和热稳定性,以及能在 -253°C ~ 700°C 的环境中工作的优点,已经成为制造航空航天发动机的关键材料^[1-3]。但由于镍基高温合金具有强度高、塑性大和导热系数低等特点,使其在加工中需要的切削力大,加工硬化明显,对刀具损伤较大。而

切削力作为切削加工的重要参数,对工件的表面质量、尺寸精度、刀具的选择、功率的计算以及机床夹具的设计都有重要的影响^[4-6]。

使用试切法探究切削过程,不仅成本高、效率低,而且容易造成工件和刀具的损坏。而随着计算机图形处理技术的发展,有限元仿真模拟技术逐渐运用于研

收稿日期:2019-01-02;修回日期:2019-05-10

基金项目:国家自然科学基金:高温合金大型复杂结构电弧增材与铸锻铣一体化制造技术(61409230303);国家重点新产品开发计划(2010GRC10021)。

第一作者简介:王智(1991),山东淄博人,硕士研究生,主要研究方向为现代机械设计与制造。通信作者:吕彦明(1966),山西太原人,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为计算机辅助设计及制造、模具 CAD、数字控制技术等。E-mail:1306187802@qq.com

究切削过程。Parida 等^[7]利用仿真软件建模,对高温合金进行仿真切削,分析切削力和切屑形态与刀具刃口的关系。高东强等^[8]建立了高温合金切削有限元仿真模型,通过对切削力和切屑形态的分析,得到刀具前角为 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 比较合适。孙会来等^[9]建立了 7072 铝合金切削二维仿真模型,模拟得到仿真过程中的切削力、切削热和应力应变值,并与实际加工理论相匹配,证明有限元切削仿真的正确性。

课题组针对 GH4169 切削加工过程中的切削用量对切削力的影响,进行了基于 ABAQUS 的切削模拟仿真,以期对切削参数优化、机床夹具设计及刀具的合理选择提供参数依据。

1 建立切削有限元模型

1.1 高温合金材料本构模型

高温合金在切削过程中,由于高温、大变形和大应变率而产生弹塑性应变。因此,在选择本构模型时应考虑应变、应变率以及热软化效应对工件硬化应力的影响,所以选择 Johnson-Cook 本构关系模型^[10]:

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

式中: σ 为流动应力; A 为准静态条件下的屈服强度; B 为应变硬化参数; C 为应变率强化系数; ε 为等效塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为材料的参考应变率; T_0 为转化温度; T_{melt} 为材料熔化温度; n 为材料应变硬化模数和硬化指数; m 为热软化参数。

J-C 本构模型是应变硬化效应、应变率效应、温度效应的乘积。

GH4169 的 J-C 本构参数如表 1 所示。

表 1 GH4169J-C 本构方程参数

Table 1 Johnson-Cook constitutive parameter for GH4169

A/MPa	B/MPa	C	n	m
1 200	1 284	0.006	0.54	1.20

1.2 材料损伤与切屑分离准则

切屑分离准则可分为几何和物理分离准则,为了更符合切削加工情况,文中选用物理分离准则作为切屑的分离准则,可以由物理量是否到达阈值来判断切屑分离。Johnson-Cook 损伤演化模型^[11]可以较好地描述金属材料的损伤,当破坏参数大于 1 时材料失效,破坏参数模型为:

$$w = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\Delta \varepsilon_j^{\text{pl}}}{\varepsilon_f^{\text{pl}}} \right). \quad (2)$$

式中: w 为单元积分点的等效塑性应变与临界等效塑性应变之比; $\Delta \varepsilon^{\text{pl}}$ 为等效塑性应变率增量; $\varepsilon_f^{\text{pl}}$ 为材料失效时的等效塑性应变。

表示为:

$$\varepsilon_f^{\text{pl}} = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{\text{pl}}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 + d_5 \hat{\theta}]. \quad (3)$$

式中: p 为压应力; q 为等效应力; $\dot{\varepsilon}^{\text{pl}}$ 为塑性应变率; $\hat{\theta}$ 为参考温度; d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 为材料的失效参数。GH4169 的失效参数如表 2 所示。

表 2 GH4169 的失效参数

Table 2 Johnson-Cook Failure parameter for GH4169

d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
0.11	0.75	-1.45	0.04	0.89

在使用有限元仿真模拟金属切屑分离时,常使用位移分离法和能量分离法。课题组选用位移分离法作为切屑分离准则,其公式为:

$$D = \frac{\bar{u}^{\text{pl}}}{u_f^{\text{pl}}} = \frac{\bar{u}^{\text{pl}}}{L \varepsilon_f^{\text{pl}}}. \quad (4)$$

式中: $\bar{u}^{\text{pl}}$ 为等效塑性位移; u_f^{pl} 为失效时等效塑性位移; L 为单元特征长度; $\varepsilon_f^{\text{pl}}$ 为材料失效时的等效塑性应变,当 $D \geq 1$ 时,材料的单元即失效。

1.3 刀-屑摩擦模型

在加工过程中,会产生不同的 2 种摩擦区域:黏结区和滑移区。当摩擦力小于极限剪切力时,切屑挤压刀具,切削温度升高,散热缓慢,接触面呈黏结状态;当摩擦力大于极限剪切力时,接触面呈相对滑移状态,这个区域距刀间较远,散热较快。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \mu \sigma_n, \text{ 当 } \tau \leq \tau^* \text{ (滑移区); } \\ \tau &= \tau^*, \text{ 当 } \tau \geq \tau^* \text{ (黏结区)。} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: τ 为摩擦应力; μ 为摩擦因数; σ_n 为正应力; τ^* 为最大剪切应力。

1.4 几何建模

在切削过程中,由于切削层和分离层的厚度远小于工件的宽度,因此高温合金的切削过程可以简化为二维正交切削仿真模型。工件分为切削层、分离层和基体 3 部分。由于刀具硬度远高于工件,因此,刀具可以定义为刚体。刀具和工件单元网格都采用 CPE4RT。建立二维正交仿真模型,如图 1 所示。

2 有限元仿真结果及分析

2.1 仿真结果

以切削速度 $v_c = 120 \text{ m/min}$, 进给量为 $f = 0.04$

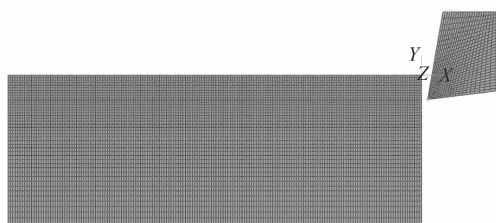


图1 二维正交切削模型

Figure 1 Two-dimensions orthogonal cutting model
mm/r, 切深为 $a_p = 1$ mm 为例, 切削过程应力云图如图 2 所示。可见, 切屑类型为带状切屑, 切削层经塑性变形后被刀具分离, 并随前刀面流出。呈现带状切屑说明整个切削过程较为稳定。切削过程中, 应力主要集中于第一变形区, 这是由于第一变形区的弹塑性变形和加工硬化引起的。随着切削的进行, 第一变形区的应力也在屈服极限周围浮动, 这与切削加工过程中切屑分离的实际情况是相符的。切削力变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 随着刀具开始切入工件, 切削力迅速增大, 随着切削过程趋于平稳, 切削力的变化也逐渐变得稳定。这和工件的实际加工过程中切屑形态表现出的平稳加工是相符的。同时, 主切削力远大于进给力。

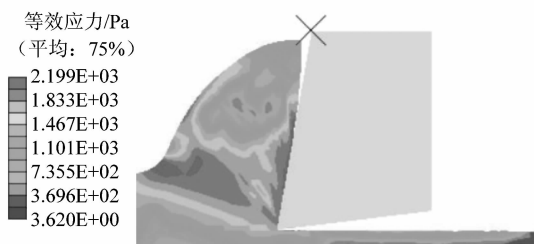


图2 切削过程应力云图

Figure 2 Graph of cutting strain field

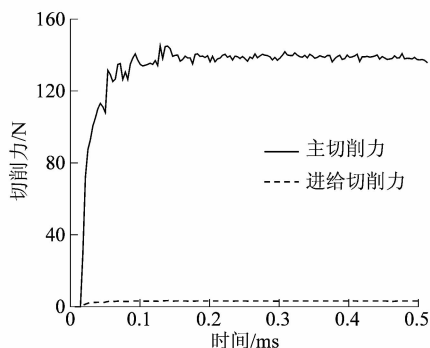


图3 切削过程切削力变化曲线

Figure 3 Curve result of cutting force in cutting

2.2 切削速度对切削力的影响

高温合金在高速切削时, 切削力更小, 切削变形量

少, 刀具磨损缓慢, 可以提高刀具寿命。因此, 在本次仿真中, 切削过程为高速切削。

进给量 $f = 0.08$ mm/r, 切深 $a_p = 1$ mm, 切削速度 v_c 为 60 ~ 300 m/min。当切削速度增加时, 切削力的变化规律如图 4 所示。

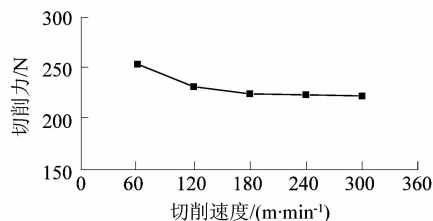


图4 切削力受切削速度的影响趋势

Figure 4 Effect of cutting speed on cutting force

从图 4 中可以看出在高速切削过程中, 切削速度从 60 ~ 120 m/min 时, 切削力减小趋势最大, 切削速度为 120 ~ 180 m/min 时, 切削力减小趋势变缓, 当切削速度大于 180 m/min 时切削力的变化趋势不明显。这是由于, 在切削速度为 60 ~ 180 m/min 的高速切削运动中, 随着切削速度的提升剪切角会增大, 同时, 由于速度提升带来的切削温度升高会使材料的热软化效果增强, 切削抗力减小, 同时随着前刀面温度大幅提升, 会使前刀面处摩擦力减小, 使得切削力变小。当切削速度达到一定值后, 切削速度继续提升, 切削温度的增加变得微乎其微。如图 5 所示, 切屑温度随着切削速度的提升变化趋势逐渐放缓, 在切削速度从 60 m/min 增加到 180 m/min 时, 切屑温度升高快, 切削速度高于 180 m/min 时, 切屑最高温度趋于平缓。由温度导致的热软化效应趋于相同, 使得切屑与前刀面产生的剪切力与切屑流出的阻力趋于相同, 使得切削力受切削速度的影响减小。

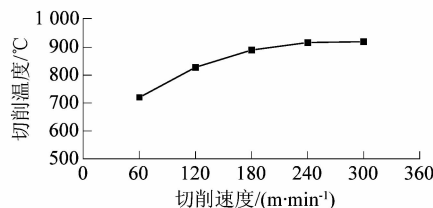


图5 切削温度受切削速度的影响趋势

Figure 5 Effect of cutting speed on cutting temperature

2.3 进给量对切削力的影响

进给量对切削力的影响如图 6 所示, 在此仿真过程中, 切削速度 $v_c = 180$ m/s, 切削深度 $a_p = 1$ mm, 进给量分别为 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 mm/r。

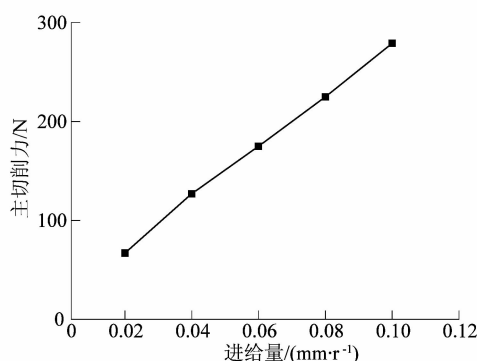


图6 切削力受进给量影响趋势

Figure 6 Effect of cutting feed on cutting force

由图6可见,切削力随进给量的增加迅速增大。这是因为接触面积 $A_c = a_p f$, 随着进给量 f 的增大, 切削面积也增大。同时当切削进给量增大时, 切削的公称厚度随之增大, 导致切屑完成塑性变形变得艰难, 使切屑的卷曲变形减小, 从而加大了切屑时的接触面积。两方面因素使得进给量增大时, 获得更大接触面积, 使摩擦力、变形力增大, 从而使得切削力迅速增大。

2.4 切削深度对切削力的影响

切削深度对切削力的影响如图7所示, 切削仿真过程中, 切削速度 $v_c = 180$ m/s, 进给量 $f = 0.08$ mm/r。切削深度 a_p 分别为 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 mm。

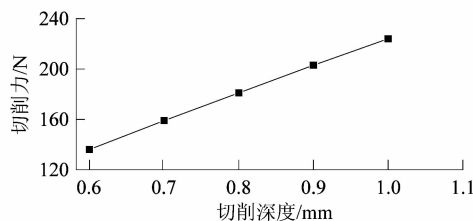


图7 切削力受切削深度影响趋势

Figure 7 Effect of cutting depth on cutting force

由图7可见, 切削力随切削深度的增大几乎呈线性正相关, 这是由于 $A_c = a_p f$, 切削深度的增加使得刀-屑之间的接触面积增大, 而切削深度使得刀-屑间的摩擦力和弹性变形总量增加, 从而, 切削力也随着之成正比增大。

3 结论

课题组利用 ABAQUS 有限元仿真软件, 通过建立

GH4169 高温合金的二维切削仿真模型, 研究了在切削过程中, 不同的切削用量对切削力的影响, 得出以下结论:

1) GH4169 高温合金在进行高速切削过程中, 切削速度在 60 ~ 180 m/min 范围内时, 切削力会随切削速度的增大而减小, 当切削速度大于 180 m/min, 切削力会趋于稳定。但切削速度对切削力的影响相对较小。

2) 在高速切削过程中, 切削力与进给量和切削深度都呈线性相关, 切削力随着进给量和切削深度增加而增大。相较切削速度而言, 进给量和切削深度对切削力的影响要大得多。

参考文献:

- [1] 傅玉灿. 难加工材料高效加工技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 4-25.
- [2] 庄景云. 变形高温合金 GH4169 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 1-3.
- [3] 肖茂华, 何宁, 李亮, 等. 镍基高温合金高速铣削的切削热研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(11): 105-109.
- [4] COLOMBO V, GHEDINI E, MASINI G, et al. 2-D and 3-D fluid dynamic and plasma characterization of DC transferred arc plasma torches for metal cutting[J]. High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Tech-Ology Plasma, 2006, 10(3): 379-392.
- [5] 刘战强, 万熠, 艾兴. 高速铣削中切削力的研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(9): 20-23.
- [6] 杨毅青, 张斌, 刘强. 铣削建模中多种切削力模型的分析比较[J]. 振动工程学报, 2015, 28(1): 82-90.
- [7] PARIDA A K, MAITY K. Effect of nose radius on forces, and process parameters in hot machining of inconel 718 using finite element analysis[J]. Engineering Science & Technology, 2017, 20(2): 687-693.
- [8] 高东强, 王俊杰, 王悉颖. 镍基高温合金切削过程有限元仿真及刀具参数研究[J]. 工具技术, 2017, 51(10): 80-83.
- [9] 孙会来, 李丹, 赵方方, 等. 基于 ABAQUS 的航空 7075 铝合金切削二维仿真[J]. 天津工业大学学报, 2017, 36(1): 83-88.
- [10] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [EB/OL]. (2011-11-15) [2018-12-20]. <https://wenku.baidu.com/view/2a32ef1555270722192ef73f.html>.
- [11] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.