

基于应变梯度理论的微切削毛刺仿真研究

王全意,丁辉,程凯,赵亮

哈尔滨工业大学

摘要: 在微切削过程中,为了更准确地研究材料尺寸效应对毛刺高度和宽度产生的影响,基于应变梯度理论对传统的 Johnson-Cook 本构模型进行修正,然后通过用户子程序 vumat 将其导入 ABAQUS 有限元软件进行出口毛刺仿真。通过仿真结果可知:在考虑材料尺寸效应的条件下,随着切削厚度的增加,剪切变形区内最大应力值会减小,并向不考虑材料尺寸效应时的最大应力值靠近;在考虑材料尺寸效应的条件下,水平方向上的切削力会变大,进而导致出口毛刺的高度值和宽度值均大于不考虑材料尺寸效应时的对应值。

关键词: 应变梯度理论;材料尺寸效应;出口毛刺

中图分类号: TG506.9;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.003

Research on Micro-cutting Burr Based on Strain Gradient Theory

Wang Quanyi, Ding Hui, Cheng Kai, Zhao Liang

Abstract: In the micro-cutting process, in order to more accurately study the effect of material size effect on the height and width of the burr, the traditional Johnson-Cook constitutive model is corrected based on the strain gradient theory, and then introduced it into the finite element software ABAQUS by using the subroutine vumat to simulate the exit burr. The simulation results show that taking material size effect into account, the maximum stress value in the shear deformation zone will decrease with the increase of the cutting thickness, and the maximum stress value will be approached when the material size effect is not considered. Taking the material size effect into account, the cutting force in the horizontal direction becomes larger, and the height value and the width value of the exit burr are both larger than the corresponding values when the material size effect is not considered.

Keywords: strain gradient theory; material size effect; exit burr

1 引言

作为复杂微小零件的主要加工方式,微铣削技术具有加工效率高、精度高、范围广的优点,是微细加工领域的研究热点,具有很大的发展空间。由于微铣削所加工的零件特征尺寸小,其表面形成的毛刺尺寸相对较大,会严重影响零件的使用性能和寿命。因此对微铣削过程中产生的毛刺进行深入研究具有重要意义和应用价值。

近年来,国内外学者对微铣削过程中产生的毛刺进行了研究。1973年,美国学者 L. K. Gillespie 等^[1]最早提出了毛刺这一概念,并且指出加工时工件材料发生剧烈的塑性变形导致了毛刺产生;Schueler G. M. 等^[2]基于毛刺产生机理,将毛刺分为泊松毛刺、翻转毛刺、撕裂毛刺和剪断毛刺四种类型。微铣削是一个非常复杂的过程,根据刀具参数、切削参数以及所采用工件材料的不同,加工过程中所产生的毛刺会有不同的形态;Deng W. J. 等^[3]通过建立基于热力耦合

的二维平面应变正交切削模型对毛刺的形成进行研究,得到出口毛刺的影响因素有工件出口角度、刀具前角、每齿进给量以及切削刃圆弧半径;Guo Y. B. 等^[4]通过建立三维有限元模型对钻削进行仿真,发现毛刺的形成过程需经历开始、发展、工件材料弯曲以及毛刺最终形成四个阶段;Özel T. 等^[5]分别用未涂层刀具和 CBN 涂层刀具对 Ti-6Al-4V 材料进行试验和有限元仿真,发现 CBN 涂层刀具的加工表面质量更好,毛刺尺寸更小,刀具磨损量更小。

目前,对微铣削毛刺的研究主要使用有限元仿真法和试验法,少数学者则通过研究毛刺产生机理,建立毛刺尺寸的数学模型。与铣削相比,微铣削不仅尺寸上减小,而且具有尺寸效应等特性。上述对微铣削毛刺进行的有限元仿真研究均使用传统的 Johnson-Cook 材料本构模型,未考虑材料的尺寸效应,因此本文应用基于位错机制的应变梯度理论修正的 Johnson-Cook 材料本构模型进行二维正交切削仿真,分析工件材料尺寸效应对出口毛刺的影响。

2 基于应变梯度理论的非晶铜本构模型

金属材料进行有限元仿真分析的基础是建立合

适的材料本构模型。因为金属材料切削是一个大弹性变形、高应变率和大温度变化的复杂过程,所以与之相对的材料本构方程也较为复杂。许多学者通过大量的试验与仿真对比,发现由 Johnson 和 Cook 提出的材料本构模型能够很好地模拟金属切削过程,即

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

式中, σ_{JC} 为材料流动应力; ε 为应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率 ($1s^{-1}$); T 为温度; T_0 为室温 ($20^\circ C$); T_{melt} 为材料熔点; A, B, n, C, m 为材料本构参数, 可由试验测得。

无氧铜的 J-C 本构模型参数见表 1。无氧铜的其他相关参数见表 2。

表 1 J-C 材料模型参数

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	T_{melt} (K)
90	292	0.31	0.025	1.09	1356

表 2 无氧铜相关参数

G (MPa)	b	μ	α
39000	0.256	0.38	0.5

上述 Johnson-Cook 材料本构模型不能反映微切削过程中的材料尺寸效应, 文献[6]应用基于位错机制的应变梯度理论对传统的 Johnson-Cook 材料本构模型进行修正, 得到反映工件材料尺寸效应的本构关系式为

$$\sigma = \sigma_{JC} \sqrt{1 + \left(\frac{18\alpha^2 G^2 b}{\sigma_{JC}^2 L} \right)^\mu} \quad (2)$$

式中, G 为材料的剪切模量; b 为 Burgers 矢量; μ 为修正系数; α 为材料系数; L 为主剪切变形区长度。

从式(2)可知, 修正的 JC 本构方程流动应力的求解主要取决于主剪切变形区长度 L 的求解。在微切削中, 根据切削深度与刀具圆弧半径比值的不同, 会出现形成切屑和不形成切屑两种状态。当有切屑形成时, 主剪切变形区长度 L 为

$$L = \frac{h}{\sin\varphi} \quad (3)$$

式中, h 为未变形切削厚度 (μm); φ 为剪切角 ($^\circ$)。

文献[7]通过研究发现剪切角的表达式为

$$\varphi = \frac{t - \beta + \alpha_c}{2} \quad (4)$$

式中, t 为常量, 刀具材料为硬质合金, 工件材料为无氧铜, 此时 t 取值为 47° ; β 为刀具和工件接触的摩擦角 ($^\circ$); α_c 为刀具前角 ($^\circ$)。

当没有切屑形成时, 主剪切变形区长度 L 为刀

具和工件接触的弧长, 其表达式为

$$L = \frac{\arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)\pi R}{180} \quad (5)$$

式中, R 为刀具切削刃圆弧半径 (μm)。

上述修正的材料 Johnson-Cook 本构方程同时具有传统 Johnson-Cook 本构方程和能够描述材料尺寸效应的特点, 因此适用于微切削有限元仿真。在切削仿真时, 需要设定材料的断裂准则来模拟切屑形成。断裂时的等效塑性应变为

$$\varepsilon_f = (d_1 + d_2 e^{d_3 \sigma^*}) \left[1 + d_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \times \left(1 + d_5 \frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right) \quad (6)$$

式中, $d_1 - d_5$ 为无氧铜失效常数, 可由试验测得, 分别为 0.54, 4.89, -3.03, 0.014, 1.12; ε_f 为断裂时等效塑性应变; σ^* 为应力三轴度。

在切削仿真过程中, 刀具使工件不断发生塑性变形, 当塑性应变积累到一定值时, 该部分材料失效, 单元从网格中删除, 从而实现切屑与工件的分离。该过程表达式为

$$D = \sum \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (7)$$

式中, $\Delta\varepsilon$ 为等效塑性应变增量; D 为失效参数, 当 D 达到 1 时, 单元失效。

3 微切削有限元仿真模型的建立

采用 ABAQUS 软件对微切削进行建模和仿真。刀具材料选用硬质合金, 刀具前角为 5° , 后角为 10° , 切削刃钝圆半径为 $4\mu m$, 工件材料选用无氧铜, 仿真中刀具材料和工件材料属性见表 3。

表 3 工件和刀具材料属性

材料属性	密度 ρ (kg/m^3)	弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν
无氧铜	8960	124	0.34
YW1	13000	580	0.30
材料属性	线膨胀系数 α ($10^{-6}/^\circ C$)	导热率 λ ($W/(m \cdot ^\circ C)$)	比热容 C ($J/(kg \cdot ^\circ C)$)
无氧铜	18.5	390	383
YW1	5.5	50.24	4.00

由于本次仿真不考虑刀具磨损情况, 因此将刀具设置为刚体。为减少仿真时间, 切削区域内的网格划分较细密, 非切削区域内的网格划分较稀疏, 划分后的网格情况见图 1。

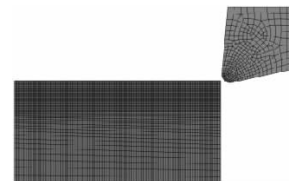


图 1 二维切削网格划分模型

4 材料本构模型的二次开发与验证

ABAQUS 有限元软件中有很多材料本构模型,如考虑应变梯度,需要用户自编 vumat 子程序。使用 Fortran 语言根据上述修正的材料本构模型编写子程序 vumat,利用 ABAQUS 调用调试成功的 vumat 子程序进行仿真。分别使用软件自带的 Johnson-Cook 材料本构模型和修正的 Johnson-Cook 材料本构模型进行切削仿真,通过对比仿真结果验证修正的本构模型是否正确。仿真时,切削深度为 $4\mu\text{m}$,切削速度为 $45\text{m}/\text{min}$,切削条件为干切削。图 2 为不考虑材料尺寸效应的应力云分布,图 3 为考虑材料尺寸效应的应力云分布。

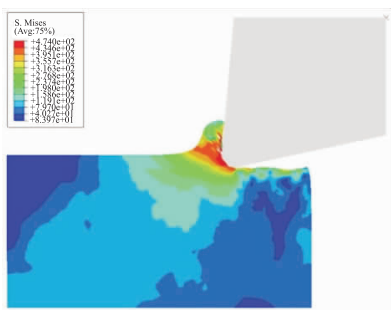


图 2 不考虑材料尺寸效应的应力云分布

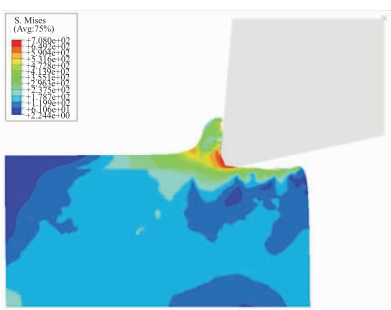


图 3 考虑材料尺寸效应的应力云分布

通过比较图 2 和图 3 的仿真应力云图可以得出:二者仿真所得的应力场分布大致相同,由于考虑材料尺寸效应的原因,图 3 的最大应力值 (708.0MPa) 大于图 2 的最大应力值 (474.0MPa)。为了进一步研究材料尺寸效应对剪切区内最大应力的影响,分别在切削厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $4\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 的条件下进行切削仿真,测量各切削厚度下同一位置的最大应力值(见图 4)。

由图 4 可以看出:考虑材料尺寸效应时,随着切削厚度的减小,剪切区内最大应力值明显增加;不考虑材料尺寸效应时,随着切削厚度的变化,最大应力值基本上保持不变。同时还可以看出:随着切削厚度的增加,两种模型最大应力的差值不断减小。说

明随着切削厚度的增加,考虑材料尺寸效应的本构模型逐渐向传统的本构模型靠近。因此,考虑材料尺寸效应的本构模型既适用于微切削仿真,又适用于传统切削仿真。

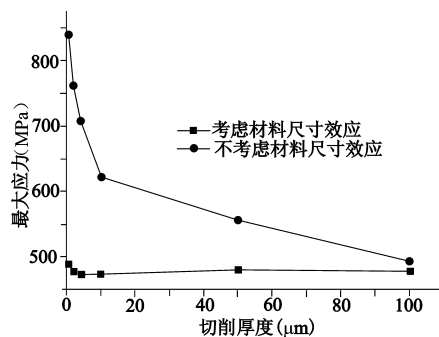


图 4 切削厚度与最大应力的关系

5 二维正交切削出口毛刺仿真

为了验证材料尺寸效应对出口毛刺的影响,对微切削过程进行二维正交切削仿真。切削深度为 $4\mu\text{m}$,切削速度为 $45\text{m}/\text{min}$,切削条件为干切削。图 5 为不考虑材料尺寸效应的仿真云图,图 6 为考虑材料尺寸效应的仿真云图。



图 5 不考虑材料尺寸效应的仿真云图

通过图 5 和图 6 可以看出:考虑材料尺寸效应时的出口毛刺高度 ($10.576\mu\text{m}$) 大于不考虑材料尺寸效应时的出口毛刺高度 ($8.285\mu\text{m}$);考虑材料尺寸效应时的出口毛刺宽度 ($14.013\mu\text{m}$) 大于不考虑材料尺寸效应时的毛刺宽度 ($7.909\mu\text{m}$)。



图 6 考虑材料尺寸效应的仿真云图

为了进一步研究材料尺寸效应对出口毛刺高度和宽度的影响,分别在切削厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $4\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 的条件下进行切削仿真,分别测量出口毛刺高度值(见图 7)和宽度值(见图 8)。

由图 7 和图 8 可以得出:随着切削厚度的增加,出口毛刺高度和厚度均增加;考虑材料尺寸效应时的出口毛刺高度和宽度分别大于不考虑材料尺寸效

应时的出口毛刺高度和宽度。

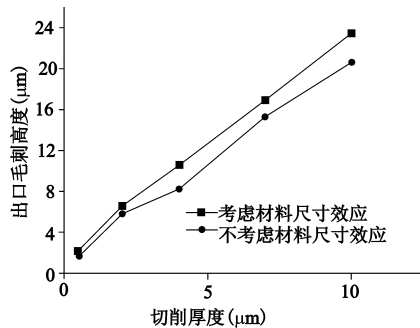


图7 切削厚度与出口毛刺高度的关系

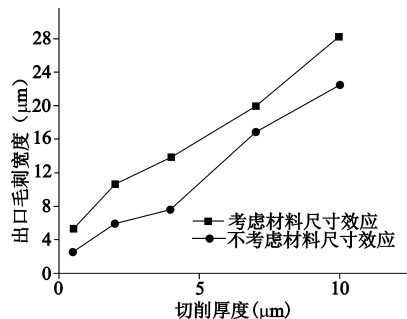


图8 切削厚度与出口毛刺宽度的关系

为了分析上述两种情况出口毛刺高度和宽度不同的原因,在切削速度为45m/min、干切削条件下,分别测量切削厚度为0.5μm、2μm、4μm、7μm、10μm时的水平切削力(见图9)。由图可知,随着切削厚度的增加,水平方向上的切削力会增加;并且在同一切削厚度条件下,考虑材料尺寸效应时的切削力大于不考虑材料尺寸效应时的切削力。这是因为在考虑材料尺寸效应时,出口处负剪切区域形成更早,从而导致出口毛刺高度和宽度更大。

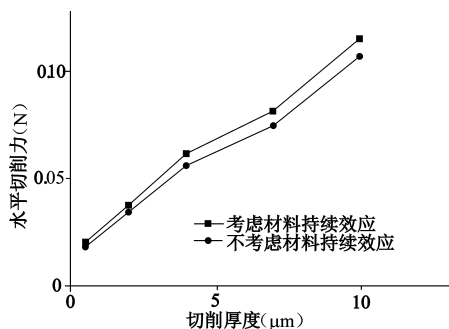


图9 切削厚度与水平切削力的关系

6 结语

(1) 基于材料应变梯度理论建立的本构模型既可以描述切削过程中大应变、高应变率、高温度的特性,又可以描述微切削过程中材料尺寸效应的特性,因此该模型适用于微切削仿真。

(2) 考虑材料尺寸效应时,随着切削厚度的增加,剪切变形区内的最大应力值会减小;当切削厚度增加到一定值时,最大应力值和使用传统本构模型仿真的最大应力值趋于相同。

(3) 在同一切削厚度条件下,考虑材料尺寸效应的出口毛刺高度值和宽度值均大于不考虑材料尺寸效应的对应值。这主要是因为考虑材料尺寸效应的条件下,水平方向上的切削力更大,导致出口处塑性变形严重,更早地形成负剪切区,从而产生更大的出口毛刺高度和宽度。

参考文献

- [1] L K Gillespie, P T Blotter. The formation and properties of machining burrs [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 1976, 98(1): 66 - 74.
- [2] Schueler G M, Engmann J, Marx T, et al. Burr formation and surface characteristics in micro-end milling of titanium alloys [C]//Burrs-Analysis, Control and Removal, 2010: 129 - 138.
- [3] Deng W J, Xia W, Tang Y. Finite element simulation for burr formation near the exit of orthogonal cutting [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(9 - 10): 1035.
- [4] Guo Y B, Dornfeld D A. Finite element modeling of burr formation process in drilling 304 stainless steel [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2000, 122(4): 612 - 619.
- [5] Özel T, Thepsonthi T, Ulutan D, et al. Experiments and finite element simulations on micro-milling of Ti-6Al-4V alloy with uncoated and CBN coated micro-tools [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 85 - 88.
- [6] 李红涛. 介观尺度材料力学性能建模及微铣削工艺优化研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [7] Shaw M C. The size effect in metal cutting [J]. Sadhana, 2003, 28(5): 875 - 896.

第一作者: 王全意, 硕士研究生, 哈尔滨工业大学机电工程学院, 150001 哈尔滨市

First Author: Wang Quanyi, Postgraduate, School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

通信作者: 丁辉, 副教授, 哈尔滨工业大学机电工程学院, 150001 哈尔滨市

Corresponding Author: Ding Hui, Associate Professor, School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China