

航空铝合金高速铣削锯齿形切屑形成有限元模拟

殷继花,林有希,孟鑫鑫,左俊彦,侯湘宇
(福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350108)

摘要:高强度铝合金高速铣削形成的锯齿形切屑,严重影响加工稳定性和零件表面质量。采用 Johnson-Cook 本构方程及损伤准则,选用合适的沙漏控制模型,对航空铝合金 7075-T651 高速切削过程中锯齿形切屑的形成进行了模拟,并经文献中高速切削试验数据验证了所提出的有限元模型。结果表明,在 2 m/s~20 m/s 的切削速度范围内,锯齿形切屑形貌得到了准确的预测。

关键词:航空铝合金 7075-T651;高速铣削;锯齿形切屑;有限元模拟

中图分类号: TG506.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2019)05-0075-05

Finite Element Simulation of Sawtooth Chip Formation for High-speed Milling of Aviation Aluminum Alloy

YIN Jihua, LIN Youxi, MENG Xinxin, ZUO Junyan, HOU Xiangyu

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Sawtooth chips are formed in high speed cutting process of high strength aluminum alloy, which seriously affect the processing stability and surface quality of parts. Johnson-Cook constitutive equation and damage criterion are used with the suitable hourglass control model to simulate the formation of the sawtooth chip in high-speed cutting process of aviation aluminum alloy 7075-T651. The finite element model is verified by high speed cutting experiment data from the literature. The results show that the sawtooth chip morphology is accurately predicted within the cutting speed range of 2 m/s~20 m/s.

Keywords: AA 7075-T651 alloy; high-speed milling; sawtooth chip; FE simulation

0 引言

高强度铝合金具有密度低、比强度高、耐磨性好、加工性能高以及焊接性能优异等特点,广泛应用于航空航天等领域,飞机的桁条、翼盒、主框和蒙皮等航空结构件都采用航空铝合金制造而成^[1]。随着航空结构件呈现大型化、整体化和内腔复杂化的趋势,此类航空结构件高效、高精度、高质量的加工离不开高速铣削加工技术。但高强度铝合金高速铣削时,极易形成锯齿状切屑,导致切削力高频率波动,加剧工件残余应力变形,导致刀具磨损和破损,缩短刀具寿命,降低已加工表面质量。因此,针对易产生变形的铝合金材料(目前多数针对硬度较高的难加工材料^[2-4])研究锯齿形切屑的形成过程及其演变机理,有助于延长刀具寿命,保证工件表面加工质量。

锯齿形切屑形成机理主要归结为绝热剪切理论和周期脆性断裂理论。绝热剪切理论认为,在高应变和高应变率的条件下,锯齿形切屑是高温下作用的突变性局部集中剪切滑移或塑性变形^[5]形成的;而周期性脆性断裂理论认为,锯齿形切屑是由于周期规律性整体断裂形成,而此理论裂纹出现的位置也是一个争议点。Jomaa W^[6]

建立二维切削仿真模型研究表明:由于巨大剪切应变使得切削层表面和刀尖处开始出现损伤,进一步演化为裂纹,并向自由表面扩展而形成锯齿状切屑。Guo Y B等^[7]仿真高速铣削难加工材料 AISI4340 时的结论则表明:裂纹先由工件与刀具刀尖接触处产生并扩展,继而切削层表面产生裂纹并扩展,直至两裂纹扩展相遇,发生绝热剪切,形成不连续切屑,从而导致切削力波动剧烈,影响加工表面质量。

锯齿形切屑的单节切屑的形成过程短暂,采用机床快停实验方法对机床要求高,并且无法准确研究切屑形成的各个阶段,而有限元方法具有成本低、易操作、速度快的优点,适合用来分析锯齿形切屑的成形机理。本文建立航空铝合金 7075-T651 高速铣削有限元模型,采用 J-C 本构方程结合损伤演化准则描述材料的行为,用拉格朗日公式模拟锯齿形切屑的形成,研究锯齿形切屑形成机理。

1 高速铣削有限元模型建立

1.1 几何模型、工件及刀具材料模型

高速铣削加工有限元模拟时,复杂的铣刀模型导致建

基金项目:国家自然科学基金(51375094)

作者简介:殷继花(1994—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为制造摩擦学。

模花费时间较长,影响仿真效率,故常对铣削仿真进行简化,将三维周铣等效简化为二维正交切削(简化过程参见文献[8]),模拟铣刀各齿的切削过程,可以显著地简化刀具,减少工件网格的数量,提高模拟效率。在假定平面应变条件下,正交切削过程有限元模型的几何形状如图1所示,分析3种切削速度(2 m/s、10 m/s、20 m/s)下切屑的几何形状。

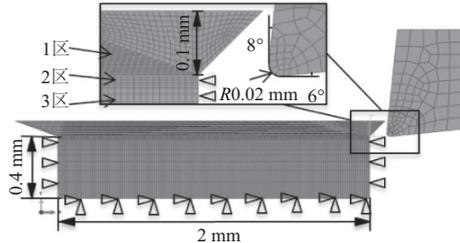


图1 正交切削过程的几何模型和边界条件

工件材料选用航空铝合金 7075-T651,刀具材料则选用硬质合金 P20。工件及刀具的材料特性记录见表1^[10-12]。采用 J-C 本构方程^[9]模拟 AL7075-T651 合金的热-力学行为,描述了应力随应变、应变率和温度变化规律的关系。关系式如下:

$$\sigma = [A+B(\varepsilon_p^n)] (1+C \ln \dot{\varepsilon}^*) \left[1 - \left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

表1 工件 AA7075-T651 及刀具 P20 材料特性

材料特性	工件材料 AA7075-T651	刀具材料 P20
密度/(kg/m ³)	2 810	15 700
弹性模量/GPa	71.7	705.0
泊松比	0.33	0.23
比热容/(J/kg·K)	1 075	178
热导率/(W/m·K)	151.6	24.0
热膨胀/K	25.2×10 ⁻⁶	5
熔点/K	908	—

为了模拟高速铣削铝合金材料时切屑的分离,采用 Johnson Cook^[13]所建立的基于等效塑性应变来考虑应变、应变率、温度和压力的剪切失效损伤规律,设定材料断裂准则,即在切削过程中,满足该准则的单元或节点被分割或删除,模拟生成切屑的过程。单元损伤失效计算定义为:

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

当 $D=1$ 时,材料发生破碎,相关的网格单元被删除。其中断裂应变 $\bar{\varepsilon}^{pf}$ 的表达式为:

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

材料本构参数及损伤参数取值参考文献[6,13-15]等,如表2所示。

表2 AA7075-T651 的 J-C 材料本构及损伤参数

材料本构参数		损伤参数	
A/MPa	527	D_1	0.110
B/MPa	575	D_2	0.572
C	0.017	D_3	-3.446
n	0.72	D_4	0.016
m	1.61	D_5	1.099
$\dot{\varepsilon}_0/(s^{-1})$	1		
T_0/K	298		
T_m/K	908		

1.2 刀-屑接触摩擦模型、边界条件和有限元网格

切削过程中,刀具-切屑接触面、刀具-已加工表面接触面存在剧烈的摩擦现象。采用基于正应力和剪切应力分布规律的粘滑摩擦法,将接触区域分为滑动区和粘着区。粘着区的流动应力等于塑性屈服力,近似为一个常数,滑动区则采用库仑摩擦模型,描述为:

$$\tau_f(x) = \begin{cases} \tau_p & 0 < x \leq l_p \\ \mu \sigma_n & l_p < x \leq l_c \end{cases} \quad (4)$$

其中摩擦系数 μ 取值为 0.3。边界条件设置如图1所示。工件底边 x, y 方向均约束为 0 位移,其左侧和右侧的节点 y 方向约束为 0 位移。刀具定义为刚体,取刀具右上角节点为参考点,定义切削速度。

刀尖和未切削工件层定义高密度网格。刀具前刀面与后刀面也采用线性偏离方式划分网格,刀尖处网格高度最小为 10 μm ,而后尺寸逐渐增大,采用自由网格。将工件的网格划分为 3 个区域:未切削工件层(1区)、切削加工影响区(2区)和工件基体部分(3区)。1区网格倾斜 20°,网格单元高度为 10 μm ,以捕捉剪切局部化现象,促进切屑流动。1区切削层右端突出三角形区域是为防止刀具初始切削时的冲击所设置,以免其影响工件应力场。2区网格受切削加工的影响形成已加工表面,可得到已加工表面质量等数据,需对其进行较精细的网格划分,故划分为单元高度 5 μm 的网格单元。3区网格以线性偏离方式划分网格,工件底部网格尺寸最大。3个区域均采用结构化网格。

工件和刀具均采用 CPE4RT 型平面应变四节点四边形单元进行建模,这种单元由于使用一个集成点会发生零能量模式,导致网格不受控制的变形,被称为沙漏效应,造成数值解不准确。在 ABAQUS/EXPLICIT 6.14 中,可通过给单元加上一定的刚度对沙漏进行控制,有 3 种沙漏控制模式:stiffness、relax stiffness、enhance。

图2所示为切削速度 20 m/s 时,3种沙漏控制模型下正交切削仿真的切屑形貌,选择最佳沙漏模型来仿真锯齿形切屑的形成。图2a)为 Jomaa W^[6]对航空铝合金高速铣削时实验所得切屑形貌,图2c)stiffness沙漏模型和图2d)relax stiffness沙漏模型所生成的切屑都产生了断裂,与实验所得切屑形貌不符,相反图2b)enhance沙漏模型所得切屑形貌与实验切屑形貌相一致。

图3为切削速度 20 m/s 时,实验与 3种沙漏模型切削力比较。总体上,切削力对沙漏控制模型不太敏感,仿

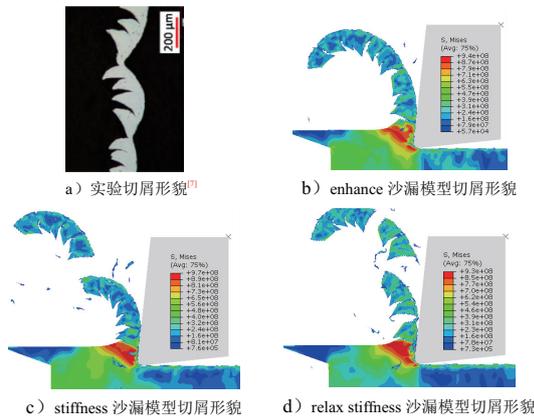


图2 $v = 20 \text{ m/s}$ 时实验及不同沙漏模型下切屑形貌

真所得切削力与实验结果吻合较好,但所提出的模型均低估了切削力,而 enhance 沙漏模型所得切削力误差较小。在所有情况下沙漏的能量均小于总应变能的 6%。综合切屑形态与切削力结果,选用 enhance 模型控制沙漏效应,从而仿真高速切削过程锯齿形切屑的形成。

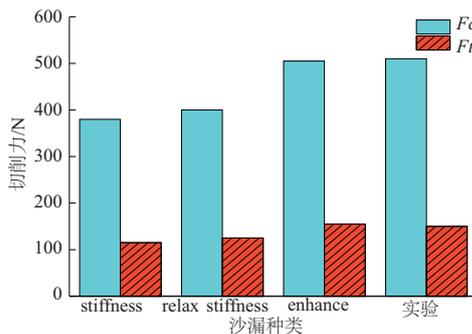


图3 $v = 20 \text{ m/s}$ 时实验、沙漏模型切削力比较

2 高速铣削有限元模型分析

2.1 铣削实验设计

为分析锯齿形切屑形成过程,设计高速铣削实验验证有限元仿真模型的准确性。工件选用 $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的块状航空铝合金 7075-T651 材料,刀具选用无涂层硬质合金刀具(P20),直径为 10 mm ,螺旋角为 30° 。设计与仿真模型相一致的切削参数进行实验研究,但由于实验条件有限,仅选取较低速度的切削参数进行实验研究。在数控雕铣机 SXDK6050D 上进行低切削速度的铣削验证试验,使用动态测力仪 Kistler 9257B 采集切削力信号,并用 Leica M205FA 体式显微镜观察所形成的切屑形貌。切削参数如表 3 所示,每组均设计 2 次试验,并收集切削过程中的切屑。

表 3 正交切削过程的切削参数

工件材料	刀具	切削距离/mm	切削深度/mm	进给量/(mm/z)	切削速度/(m/s)
AA7075-T651	P20	100	2	0.1	2

2.2 铣削力分析

航空铝合金 7075-T651 高速铣削数值仿真与实验所得径向切削力 F_c 和切向切削力 F_t 显示在图 4 中, 2 m/s 时切削力为实验所得结果,而 10 m/s 、 20 m/s 时切削力为 Jomaa W、Zaghbani I^[16] 实验所得结果,经过计算发现仿真与实验最大误差为 6%,可见仿真结果准确性。当切削速度从 2 m/s 增加到 20 m/s 时,切削力随切削速度的增加而减小。这种变化趋势可以解释为:随着切削速度的增加,切削温度升高导致材料软化,随后切削力降低。此外,文献[17]还表明,在低切削速度下,会形成积屑瘤,刀具前角增加甚至出现负前角,导致加工 AA7075-T651 合金时阻力显著增加。当切削速度提高时,刀具-切屑界面处由于高温软化作用会产生适当的摩擦条件,摩擦阻力降低,进而导致切削力降低。

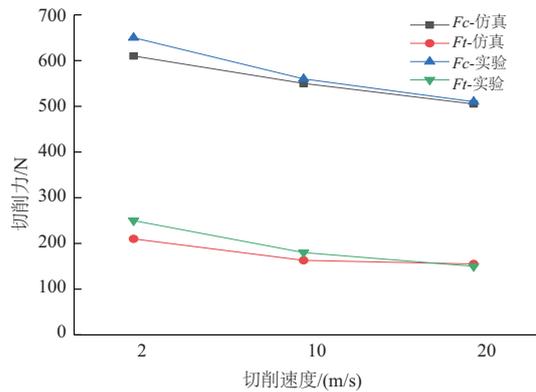
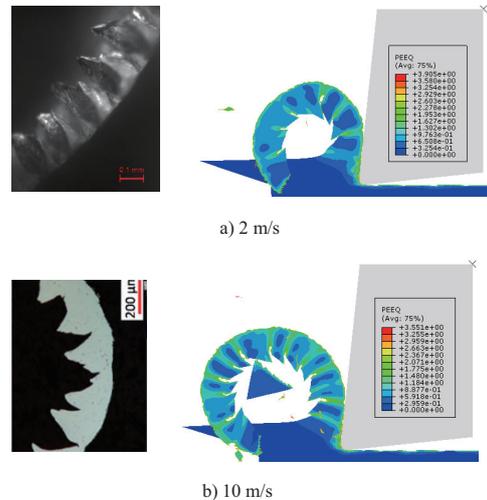


图4 不同切削速度下的切削力

2.3 铣屑形态分析

通过航空铝合金 7075-T651 高速铣削数值仿真与实验及参考文献[6]切屑形貌的比较,对所提出的有限元模型进行了验证。图 5 描述了 3 种切削速度下的仿真和实验所得切屑形貌。随着切削速度的提高,切屑变薄,切屑分割加剧,切屑曲率减小。因此,本文提出的有限元模型准确地仿真了切屑形态。



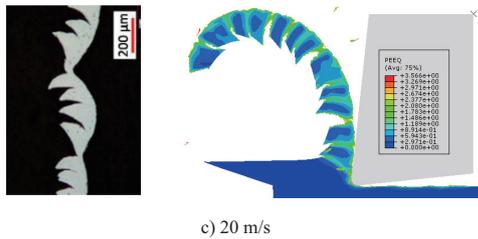


图5 不同切削速度下实验与仿真切屑形貌的比较

如图6所示,使用5个参数来描述切屑形态,分别为切屑厚度 H 、切屑连续部分的高度 h 、锯齿高度 M 、剪切带间距 S 和剪切角 φ 。图7比较了不同切削速度下的数值仿真和文献[6]实验的切屑形态参数。如图7a)和图7c)所示,随着切削速度的增加,切屑厚度和剪切带间距都有减小的趋势,而图7b)所示,切屑连续部分的高度对切削速度的变化不太敏感。相反,图7d)所示,剪切角随切削速度的增加而增大。综上所述,所建立的切削有限元模型能够仿真高速铣削过程,模拟锯齿形切屑的形成,所得铣削力、铣屑形态均与实验结果相一致,可用于分析锯齿形切屑的形成机理。

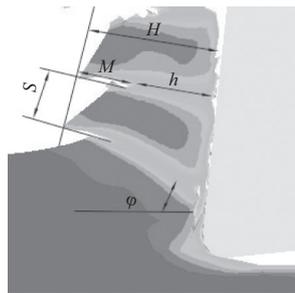


图6 锯齿形切屑的几何特性

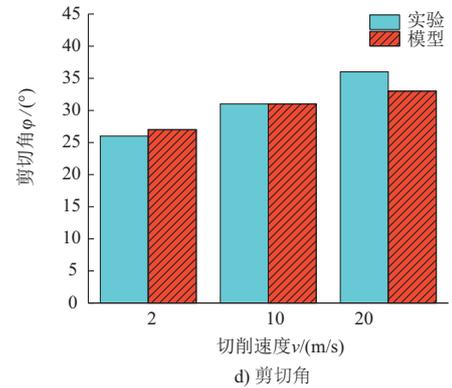
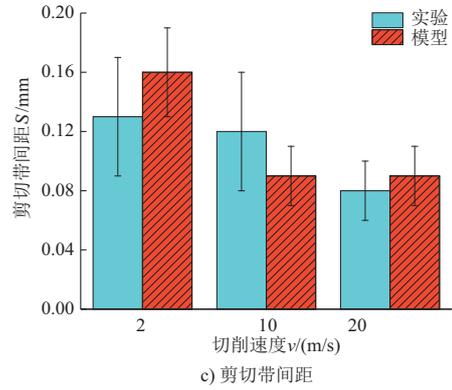
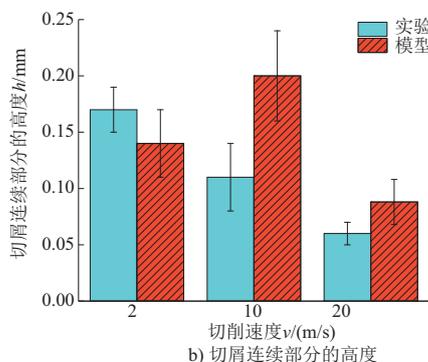
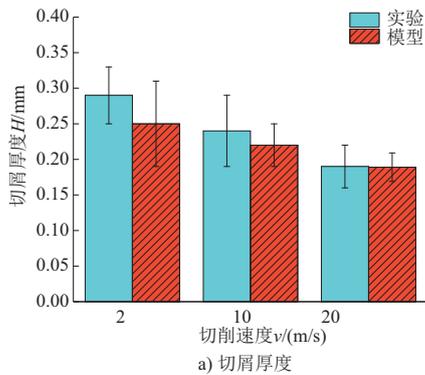
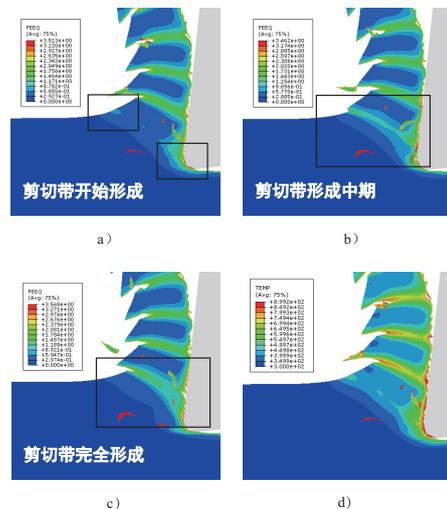


图7 有限元与参考实验数据的对比

3 锯齿形切屑形成数值分析

切削速度 20 m/s 时锯齿形切屑形成过程中的等效塑性应变、温度和剪切损伤分布如图8所示,表明锯齿形切屑是由3个步骤形成的。最初,在刀具尖端处的工件材料出现塑性应变场(图8a)。随着切削过程的进行,等效塑性应变场不断强化,向切屑自由表面形成薄平面(图8b)。在此阶段,切屑内塑性变形引起的热量增加,导致温度升高(图8e)。最后,当局部应变和温度达到一定值时,在切削工件层上滑动形成具有一定宽度的局部剪切带,并形成一个新的切屑段(图8c)、图8f)。

考虑到上述过程发生的时间很短,这一变形过程被认为是绝热过程。图8g)~图8i)显示了切屑形成过程中的



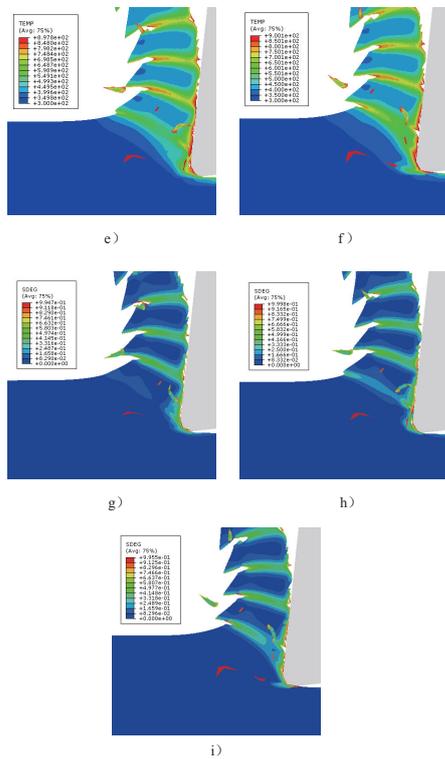
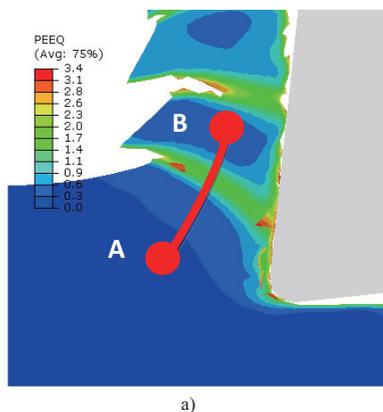


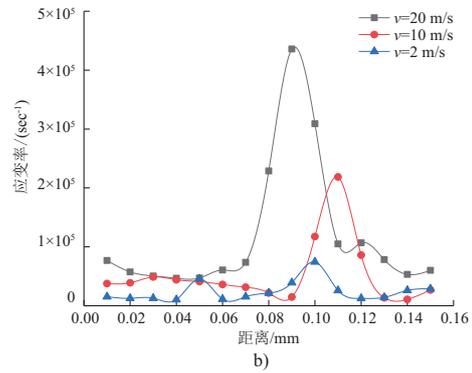
图 8 切削速度为 20 m/s 时锯齿形切屑形成过程

损伤演化,证实锯齿形切屑是在材料流动应力局部下降的情况下形成的。这种剪切突变是在热软化补偿局部高应变和高应变率引起的加工硬化时发生的。文献[18]研究指出,锯齿形切屑形成过程中剪切区的主要不稳定性是在刀尖开始绝热剪切,并向工件材料的自由表面传播,与仿真结果相一致。

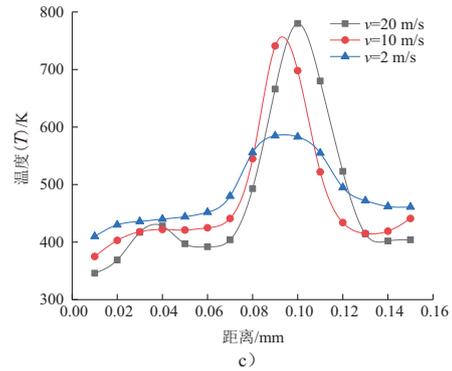
图 9 所示为切削初期的锯齿形切屑沿切屑预定路径上应变率、温度、应力的变化,图 9a)所示为一个锯齿切屑的中间层路径 AB,而图 9b)~图 9d)则为路径 AB 上应变率、温度和应力的变化。由图 9b)发现,应变率在切屑绝热剪切带处显著地增加,并且切削速度越大应变率越大,即变形越剧烈,锯齿状越明显。而这一现象的产生是由于高温集中在该剪切区(图 9c)),导致材料发生热软化,而应力突然下降(图 9d)),导致工件材料热软化效应大于加工硬化效应而出现绝热剪切,形成锯齿形切屑。



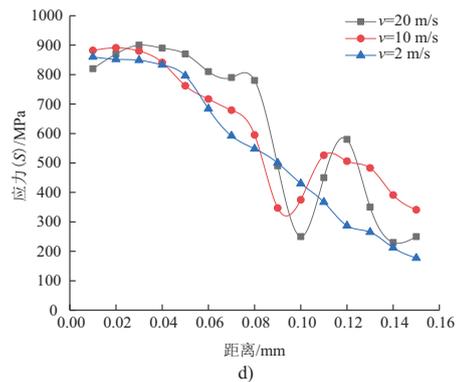
a)



b)



c)



d)

图 9 沿切屑预定路径 AB 上各参数变化

4 结语

本文对航空铝合金 7075-T651 高速铣削过程中锯齿形切屑的形成进行了数值建模。利用 ABAQUS/Explicit 6.14 有限元软件,合理简化几何模型;基于 J-C 本构方程、损伤演化方程建立了有限元模型;选用合适的沙漏控制方法,仿真高速铣削航空铝合金锯齿形切屑形成过程;从切削力、铣屑形态方面验证了模型的准确性。在切屑形成过程中,高温使切屑在剪切区局部发生材料软化效应,导致切削力减小。高速铣削过程中,刀尖处局部剪切应变形成剪切带,随后工件材料沿剪切面滑移,最终形成了锯齿形切屑。

参考文献:

[1] 田荣鑫,姚倡锋,武导侠. 高速铣削铝合金 7055 铣削力和铣削温度的仿真研究[J]. 航空制造技术, 2016, 501(6):67-71.

(下转第 84 页)