

8-5-2020

## Dynamic Simulation of Single Abrasive Grain Cutting TC4 Based on SPH Method

Wang Yan

*1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;*

Wang Shuai

*1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;*

Jianguo Liu

*1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; ;*

Xiong Wei

*2. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Dynamic Simulation of Single Abrasive Grain Cutting TC4 Based on SPH Method

### Abstract

**Abstract:** Considering the negative effects of mesh distortion on calculation accuracy in FEM simulation, a novel mesh free method named Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method was employed to simulate the process of single CBN abrasive grain cutting TC4. Establishing a SPH model of TC4 workpiece and a FEM model of single abrasive grain with cutting edges similar to the real abrasive grain, the influences of cutting depth on grinding forces and chip formative process were studied systematically. The simulation results state that grinding forces enlarge with the increase of cutting depth, while grinding force ratio decreases. And TC4 chip formative process is also closely related with cutting depth. The simulation results have little error compared with theoretical analysis, verifying the feasibility of applying SPH method to simulate the cutting process of titanium alloy.

### Keywords

TC4, single CBN abrasive grain, SPH, numerical simulation

### Recommended Citation

Wang Yan, Wang Shuai, Liu Jianguo, Xiong Wei. Dynamic Simulation of Single Abrasive Grain Cutting TC4 Based on SPH Method[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2865-2872.

# 基于 SPH 方法单颗粒磨削 TC4 动态过程模拟研究

王艳<sup>1</sup>, 王帅<sup>1</sup>, 刘建国<sup>1</sup>, 熊巍<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学材料科学与工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 考虑到 FEM(Finite Element Method)进行切削仿真时会因网格畸变而影响计算精度, 因此采用新型光滑流体粒子动力学(SPH, Smoothed Particle Hydrodynamics)无网格法对单颗 CBN(Cubic Boron Nitride)磨粒磨削钛合金 TC4 的过程进行三维数值仿真。通过建立与真实磨粒相似、刃部有一定圆弧半径的磨粒 FEM 模型及钛合金工件的 SPH 模型, 研究了磨粒切削深度对磨削力及磨屑形成过程的影响。分析结果表明: 磨削力随着磨粒切削深度的增大而增大, 磨削力比则随着切削深度的增大而减小; 当磨粒速度一定时, TC4 工件的磨屑形成情况与切削深度存在重要关系。仿真结果与理论分析吻合较好, 验证了 SPH 方法模拟单颗粒磨削钛合金材料的可行性。

**关键词:** 钛合金 TC4; 单颗磨粒; SPH 法; 数值仿真

中图分类号: TG580.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 11-2865-08

## Dynamic Simulation of Single Abrasive Grain Cutting TC4 Based on SPH Method

Wang Yan<sup>1</sup>, Wang Shuai<sup>1</sup>, Liu Jianguo<sup>1</sup>, Xiong Wei<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Materials Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Considering the negative effects of mesh distortion on calculation accuracy in FEM simulation, a novel mesh free method named Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method was employed to simulate the process of single CBN abrasive grain cutting TC4. Establishing a SPH model of TC4 workpiece and a FEM model of single abrasive grain with cutting edges similar to the real abrasive grain, the influences of cutting depth on grinding forces and chip formative process were studied systematically. The simulation results state that grinding forces enlarge with the increase of cutting depth, while grinding force ratio decreases. And TC4 chip formative process is also closely related with cutting depth. The simulation results have little error compared with theoretical analysis, verifying the feasibility of applying SPH method to simulate the cutting process of titanium alloy.

**Keywords:** TC4; single CBN abrasive grain; SPH; numerical simulation

## 引言

随着材料科学的不断发展, 钛合金等新型材料逐渐成为高科技领域中的重要材料之一。由于钛合

金具有比强度高、抗腐蚀性好、耐热性好、疲劳强度高良好性能, 在航空航天发动机、汽车零部件、医疗器械、石油化工等领域得到了广泛应用。同时钛合金具有粘、韧、化学活性高等特点, 是一种典型的难加工材料, 给加工制造带来了一定难度, 对磨削加工工艺也提出了新的要求<sup>[1-2]</sup>, 因此需要新的方法应用到钛合金材料的加工中去。

磨削加工是大量磨粒共同作用于工件表面, 达



收稿日期: 2015-02-09 修回日期: 2015-05-28;  
基金项目: 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1402);  
作者简介: 王艳(1969-), 女, 江苏, 博士, 教授, 研究方向为磨削加工与特种加工; 王帅(1988-), 男, 山东, 硕士, 研究方向为精密加工; 刘建国(1962-), 男, 浙江, 大专, 高工, 研究方向为精密磨削工艺。

<http://www.china-simulation.com>

• 2865 •

到去除材料的一种切削方法。然而由于磨粒数量多、几何形状不规则、磨削速度高、每颗磨粒的切削深度小且不一致等原因,通过试验观察和分析磨削过程十分困难<sup>[3]</sup>。单颗磨粒作为磨削的一种简化形式,是研究难加工材料磨削机理的一种重要方法。采用试验方法费用昂贵,而且很难观察到磨削过程中材料的微观变形过程。目前,许多学者采用有限元法对单颗磨粒的磨削过程进行仿真研究,言兰等<sup>[3]</sup>采用 FEM 研究了单颗粒磨削 D2 钢时磨削速度与温度变化的关系,张雪萍等<sup>[4]</sup>对单颗粒负前角变化对工件表面残余应力的影响进行了仿真分析,程泽等<sup>[5]</sup>对单颗金刚石磨粒磨削镍基合金的成屑过程进行了研究。但传统的基于拉格朗日网格的方法应用于具有极大网格变形的情况还存在许多缺陷<sup>[6]</sup>,迫切需要寻找一种无需网格进行求解的拉格朗日数值解法。

光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 方法作为一种拉格朗日形式的无网格粒子法,具有自适应性、粒子性质和拉格朗日性质,粒子之间不存在网格关系,很好地解决了传统有限元法在切削仿真时出现的网格畸变等问题。近几年来,SPH 方法在切削方面也有了深入研究,宿崇等<sup>[7]</sup>基于 SPH 方法进行 CBN 磨粒的切削模拟,分析出磨粒磨损情况及工件变形规律,段念等<sup>[8]</sup>采用 FEM 与 SPH 耦合的方法,探究了单颗磨粒磨削玻璃从塑性变形到脆性断裂的过程,通过切削力的比较,得出 FEM 与 SPH 耦合算法优于单纯的 FEM 算法,国外学者 N. Rüttimann 等<sup>[9]</sup>建立了六-八面体单颗磨粒的模型,工件采用 SPH 方法建模,分析了磨屑的产生过程。综上所述,许多学者对基于 SPH 方法的单颗磨粒切削进行了模拟,对磨粒的磨损情况、脆性材料的塑性变形到脆性断裂的转变及磨屑的形成过程等做了仿真分析,但对单颗磨粒切削深度影响磨屑形成及磨削力变化规律的研究较少。本文充分考虑到磨屑形成与磨粒切削深度的关系,应用 SPH 方法,在一定的磨削速

度下,分析了单颗磨粒在不同切削深度下,工件材料生成磨屑的过程以及磨削力的变化规律。所得结果对磨削工艺参数的选择起到了很大的指导作用。

## 1 SPH 方法计算原理

光滑流体粒子动力学法 (SPH) 是一种求解偏微分方程的数值计算方法,属于拉格朗日无网格法的一种。与基于网格的有限元法相比,SPH 方法具有自适应性的特点,而且粒子近似法能与拉格朗日公式完美结合。该方法是将函数积分的近似表达式转化为支持域内所有粒子叠加求和的离散化形式,流体的问题域最终被离散化为有限数量的粒子,其中每个粒子具有独立的质量、密度及其它物理属性,且具有明确的拉格朗日性质。经过离散化函数核近似的积分表达式可以写成如下形式:

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x') W(x-x', h) dx \quad (1)$$

其中:  $W$  是光滑核函数;  $x$  是任意点的位置矢量;  $x'$  是近似计算点的位置矢量; 在光滑函数内;  $h$  是定义光滑函数  $W$  的影响区域的光滑长度。SPH 方法中使用粒子近似求和法来近似积分,这样 SPH 方法的数值积分就无须再使用背景网格,使其成为真正意义上的无网格方法。如果光滑函数采用的是 3 次 B-样条函数的光滑函数<sup>[6]</sup>,则其定义如下:

$$W(x-x') = W(R, h) = a_d \times \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2} R^3, & 0 \leq R < 1 \\ \frac{1}{6} (2-R)^3, & 1 \leq R < 2 \\ 0, & R \leq 2 \end{cases} \quad (2)$$

在一维、二维和三维空间中分别有  $a_d = \frac{1}{h}$ ,  $a_d = \frac{15}{7\pi h^2}$  和  $a_d = \frac{3}{2\pi h^3}$ 。

正因为 SPH 方法具有的自适应性、粒子性以及与朗格朗日公式的完美结合的性质,使其在不同的学科领域得到了很多实际应用。

## 2 单颗粒切削几何模型及边界条件

### 2.1 单颗粒切削的 SPH 数值建模

在 SEM(Scanning Electron Microscope)下可以观察到 CBN 磨粒多为不规则的几何体, 给磨削仿真带来了一定困难。为了简化模型, 又不影响仿真结果的可靠性, 目前单颗磨粒的切削仿真过程中, 许多学者采用圆锥形<sup>[8]</sup>、球形<sup>[10]</sup>、多棱锥体以及六-八面体<sup>[9]</sup>等形状。本文建立了与真实 CBN 磨粒相似且刃部有一定圆弧半径的磨粒模型, 既保证了磨粒应有的前角形状, 又便于网格划分, 同时提高了计算效率。

传统的基于网格的数值计算方法, 是将工件和磨粒同时划分为具有一定单元类型的网格, 而网格依附于工件, 会跟随工件运动和变形发生相应的变化。当网格的相邻节点出现相对位移变化时, 该网格将会发生变形。因为各个网格都是相同的, 所以网格的质量不会通过共同的边界传递给其他网格。拉格朗日网格依附在工件材料上, 伴随工件而运动, 可以方便地确定和追寻运动边界、自由工件表面以及材料交界面上质点所有场变量的整个时间历程。由上可知, 拉格朗日网格用于连续固体材料的仿真分析具有优势, 也适于解决固体力学的问题, 但在处理有极大网格变形的情况时仍然存在缺陷。单颗 CBN 磨粒相对于工件可认为不会发生变形, 宜采用拉格朗日网格, 将其划分为具有 8 个节点的 solid164 单元, 该单元适用于三维实体结构且对分析大变形问题十分有效。钛合金 TC4 会因材料去除而产生大的变形, 适宜用 SPH 粒子建模。为了避免磨粒与工件接触时, 因磨粒网格与工件粒子重叠而不产生材料去除的情况产生, 磨粒的网格需要比工件粒子的密度适当大一些。

研究发现磨刃切削时的前角  $\gamma_g$  是负前角, 其尺寸在  $-60^\circ \sim -15^\circ$  之间<sup>[2]</sup>。本文建立的磨粒尺寸为上底  $R=30 \mu\text{m}$ , 高  $H=28 \mu\text{m}$ , 磨粒钝圆半径  $r=4 \mu\text{m}$ , 负前角  $\gamma_g=-30^\circ$ 。工件采用 SPH 粒子填充, 尺寸为长  $L=80 \mu\text{m}$ , 宽  $d=60 \mu\text{m}$ , 高  $h=30 \mu\text{m}$ 。粒子数为  $80 \times 60 \times 30$ 。模型如图 1 所示。

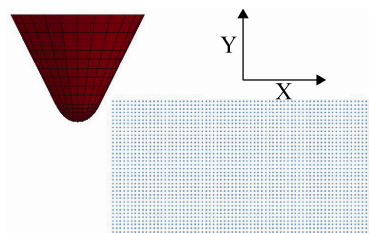


图 1 单颗磨粒模型

在 LS-DYNA 中主要有三种接触类型: 单面接触(Single Surface Contact)、面面接触(Surface to Surface)、节点-面接触(Node to Surface)。其中, 节点-面接触适用于各节点贯穿表面的状况, 接触类型的选择对仿真结果的质量有着重要的影响。单颗磨粒与工件发生接触时, 可以将 SPH 粒子视为光滑质点, 同时考虑到自动接触具有稳定性好、计算效率高等优点, 选择 AUTO-NODES-TO-SURFACE 接触, 把网格较粗的磨粒定义为主部, 粒子密度较小的工件定义为从部。

### 2.2 边界条件

工件模型如果采用 FEM 建立, 其边界可以直接利用面上的节点来进行位移约束, 但是因为 SPH 粒子之间没有几何连接, 具有无网格特性。施加类似于 FEM 的固定边界时, 只是边界上的粒子受到了约束, 而内部粒子仍然可以通过边界粒子之间的空隙穿透, 与实际的工作材料去除方式不一致, 因此, 在 LS-DYNA 中不能用 \*SPC\_SET 来进行两侧面的边界约束。

同时由于 SPH 模型边界上和靠近边界的粒子存在着一定缺陷, 即在积分的时候会被截断, 因而 SPH 方法也不适用于整个的区域内。在工件的边界和边界附近的粒子只会受到工件内部粒子对它的作用, 而边界外部没有任何粒子, 无法对它们施加影响。这种单边的影响会导致求解结果产生错误, 因为虽然边界上粒子的速度为零, 但是其它量却不一定为零, 比如密度<sup>[6]</sup>。

为了模拟更真实的磨削工况, 在工件底部施加全位移约束来阻止工件在仿真过程中发生运动。对于 SPH 模型的两侧面, 如果通过边界点来进行几

何位移约束,还存在上述诸多不足。目前,对 SPH 粒子边界进行约束的合理做法是在边界外侧创建一组与内部粒子对称的虚粒子,这些粒子被赋予与边界粒子相同的变量值,从而能够防止内部粒子非物理穿透边界。因此,本文使用 SPH 专用的边界约束方法,将工件模型两侧面作为 SPH 的对称平面,在实粒子外侧创建相应的虚粒子来进行边界约束,如图 2 所示,在 LS-DYNA 中使用关键字 \*SPH\_SYMMETRY\_PLANE 添加。因为单颗 CBN 磨粒仿真过程只沿着一个方向运动,所以需要将磨粒的 Y, Z 方向的位移及全部的转动自由度都施加约束。

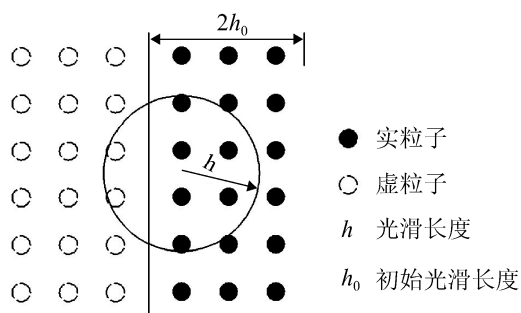


图 2 虚拟粒子构成的对称边界

### 2.3 材料本构模型选择及性能参数

钛合金 TC4(Ti-6Al-4V)属于 $(\alpha+\beta)$ 型钛合金,具有良好的机械力学性能,在很多领域得到了广泛应用,通常使用高速磨削、高速铣削等方式进行加工。在磨削加工时会出现磨削力大、黏附严重、温度较高、工件变形复杂等现象,对加工表面质量的影响很大。

金属材料的本构关系可以用来描述材料在一定条件下的应力随应变的变化规律,选择合适的本构模型对仿真结果的准确性有着重要影响。本文工件所选用的钛合金 TC4,属于典型的难加工硬质合金材料。许多研究人员在不断试验的基础上提出了多种材料的本构模型。由于 JOHNSON\_COOK 本构模型考虑了材料的热软化、应变硬化和应变率强化 3 种效应<sup>[11]</sup>,适用于大多数金属变形,因此选用该本构模型。J-C 模型的表达式为:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^{-p^n})(1 + \ln \bar{\epsilon}^*) \left(1 - \frac{T - T_{\text{rom}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{rom}}}\right) \quad (3)$$

式中:  $A$  为材料屈服强度;  $B$ ,  $n$  为应变硬化系数;  $C$  为应变率强化系数;  $m$  热软化系数;  $\bar{\epsilon}^{-p^n}$  为等效塑性应变;  $\bar{\epsilon}^*$  为有效应变率;  $T_{\text{melt}}$  为熔化温度;  $T_{\text{rom}}$  为常温。由于非线性的应力  $\sigma_y$  会随着应变等发生改变,通过泰勒级数展开式对当前时间线性化,可以避免迭代求解,提高计算效率。材料破坏时的应变  $\epsilon^f$  为:

$$\epsilon^f = \max([D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] [1 + D_4 \ln \bar{\epsilon}^*] [1 + D_5 T^*]) \quad (4)$$

上式中  $\sigma^*$  是压力和有效应力的比值,  $D_1 \sim D_5$  为常数,具体的 J-C 本构模型参数设置如表 1 所示,其中部分参数参考了刘旭阳等在试验的基础上通过曲线拟合得到的数据。

表 1 TC4 钛合金的 J-C 本构模型参数<sup>[12-13]</sup>

参数	大小	参数	大小
$A/\text{GPa}$	1.077	$D1$	0.0395
$B/\text{GPa}$	0.845	$D2$	1.0072
$C$	0.025	$D3$	1.9234
$m$	0.75383	$D4$	0.014
$n$	0.58	$D5$	3.87

与工件材料相比, CBN 磨粒的硬度、强度极高,在切削过程中的变形可以忽略,因此可以将磨粒简化成刚体模型,这样可以大大节省计算时间,提高仿真计算的效率。磨粒及钛合金工件的性能参数如表 2 所示。

表 2 TC4 钛合金及 CBN 磨粒的性能参数<sup>[7,13]</sup>

材料	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	剪切模量/ $\text{GPa}$	泊松比
TC4	4.419	44	0.34
CBN	3.52	1000	0.25

### 2.4 材料的状态方程

除了选择合适的本构模型外,钛合金 TC4 还需要设置合适的状态方程。状态方程能够反应材料的压力、体积与能量特性之间的关系,本文在计算中使用的是 Gruneisen 状态方程,在 LS-DYNA 中定义的材料压力表达式为:

$$p = \begin{cases} \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} & \text{压力} \\ \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E & \text{拉力} \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $C$  为  $v_s-v_p$  曲线截距;  $S_1, S_2, S_3$  都是  $v_s-v_p$  曲线斜率的无量纲系数;  $\gamma_0$  是 Gruneisen 状态方程的系数;  $a$  是  $\gamma_0$  的一阶修正量;  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$ 。

本文使用的状态方程数据来自文献[14], 见表 3。

表 3 TC4 钛合金 Gruneisen 状态方程参数

参数	大小	参数	大小
C(cm/μs)	0.513	$\gamma_0$	1.23
$S_1$	1.028	$a$	0.17
$S_2$	0	$E_0$	0
$S_3$	0	$V_0$	1.0

### 3 结果与分析

#### 3.1 磨粒运动分析

平面磨削时, 磨粒随着砂轮做圆周运动, 工件相对于砂轮有一个沿 X 方向的进给运动。磨粒相对于工件的运动相当于砂轮沿着固定的导轨做纯滚动, 实际的运动轨迹可以用延长摆线来表示, 表达式方程为<sup>[5]</sup>:

$$y = \frac{x^2}{[d_s(1 \pm v_w/v_s)]} \quad (6)$$

单颗磨粒在一个磨削过程中经历了滑擦(弹性变形)、耕犁(塑性变形)及切削(形成切屑并沿磨粒前面流出)3 个阶段<sup>[2]</sup>。本文主要研究磨削深度对磨屑形成过程及磨削力的影响, 因此需要假定工件固定不动, 磨削速度一定的情况下, 给磨粒沿 X 方向一恒定速度从工件表面切过, 观察在不同的切削深度下磨屑的生成情况, 并比较磨削力及磨削力比的变化规律。图 3 所示为单颗磨粒的简化运动过程。

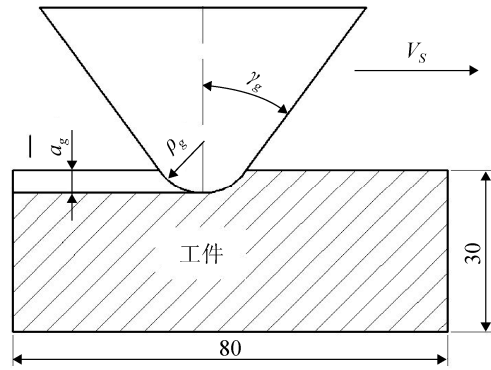


图 3 单颗磨粒运动模型

#### 3.2 磨粒切削深度对磨削力的影响分析

磨削过程中的磨削力受砂轮速度、切削深度及工件表面粗糙度等多种因素的影响, 其主要产生于砂轮与整个工件接触的区域。为便于分析, 一般将磨削力  $F$  分解成三个相互垂直的分力, 即法向磨削力  $F_n$ 、切向磨削力  $F_t$  和轴向磨削力  $F_a$ , 与其它两个分量相比  $F_a$  较小通常不计<sup>[2]</sup>。本文研究了在磨削速度等其它工况条件相同时, 磨粒的切削深度对磨削力的影响。

根据文献[15]可知磨削过程中的法向力  $F_n$  及切向力  $F_t$  分别为:

$$\begin{cases} F_n = K_1 \frac{v_w}{v_s} a_p b + K_2 \frac{v_w}{v_s} b \left( \frac{a_p}{d_s} \right)^{1/2} \\ F_t = K_3 \frac{v_w}{v_s} b a_p + K_4 b (a_p d_s)^{1/2} + K_5 b \frac{v_w}{v_s} \left( \frac{a_p}{d_s} \right)^{1/2} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中:  $v_s$  为砂轮速度;  $v_w$  为工件进给速度;  $a_p$  为切削深度;  $\theta$  为磨粒顶圆锥半角;  $b$  为磨削接触宽度,  $d_s$  为砂轮直径。其中,  $K_1 = \frac{\pi}{4} F_p \sin \theta$ ,

$K_2 = 4C\delta p_0$ ,  $K_3 = \frac{\pi^2}{16} F_p \cos \theta$ ,  $K_4 = \alpha C\delta$ ,  $K_5 = 4C\beta\delta p_0$  均可由试验得出。由公式(7)看出法向磨削力  $F_n$  及切向磨削力  $F_t$  都随磨粒切削深度  $a_p$  的增大而增大。

在仿真模型中, 设定磨粒的磨削速度  $v=15$  m/s 不变, 切削深度  $a_p$  从  $2.5 \mu\text{m}$ ~ $15 \mu\text{m}$  分别取为  $2.5 \mu\text{m}$ ,  $5 \mu\text{m}$ ,  $10 \mu\text{m}$ ,  $15 \mu\text{m}$ 。单颗磨粒的磨削力随磨粒切削深度的变化曲线如图4所示。



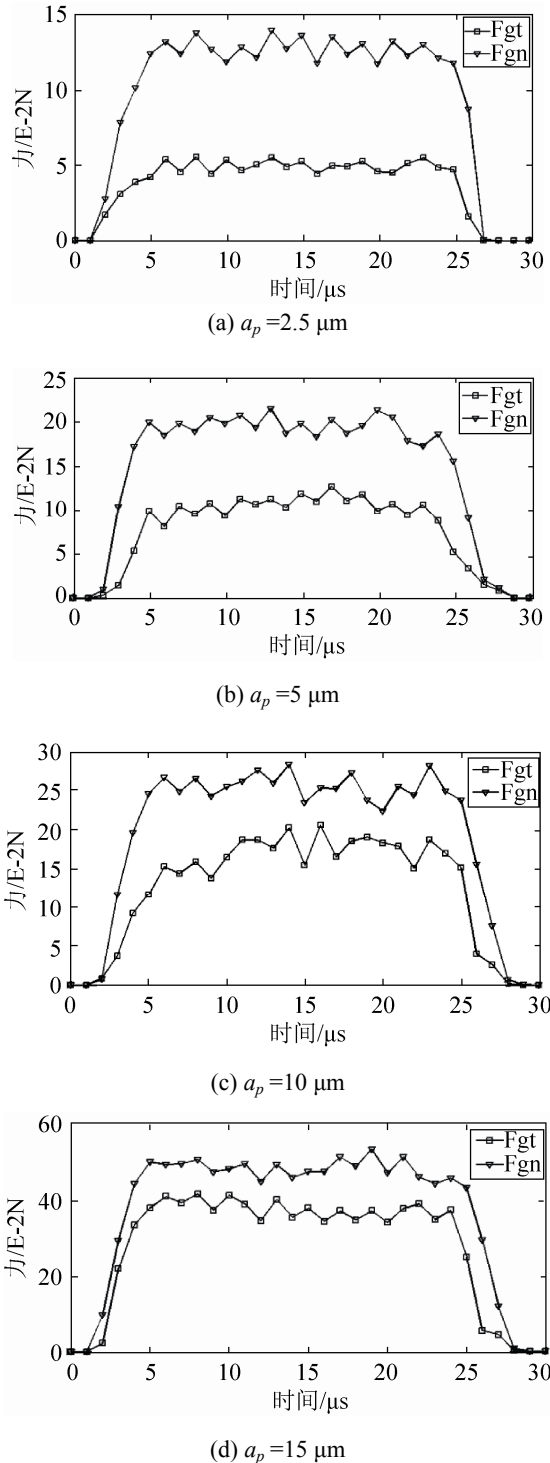
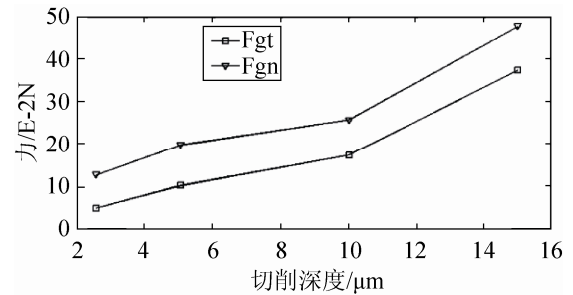
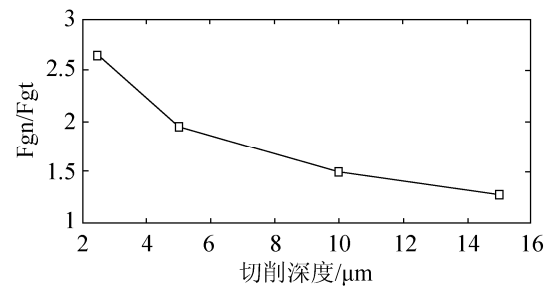


图 4 切向及法向磨削力仿真曲线图

由磨削力的曲线图可以看出,磨粒开始接触工件时磨削力有一个逐渐增大的趋势出现,然后减小至趋于平缓的波动,这是因为磨粒与工件的接触面积逐渐增大,要克服工件的弹性变形产生磨屑。工件材料在产生磨屑的过程中,由于滑移剪切产生锯

齿状的磨屑,从而导致了磨削力的微小波动。当磨粒逐渐切出工件时,磨削力也会逐渐减小。稳定阶段的磨削力可以认为是单颗磨粒磨削过程的平均磨削力。

取不同切削深度下稳定阶段磨削力的平均值,建立磨削力随切削深度变化的曲线如图 5(a)。磨粒的磨削速度不变,由不同切削深度下的磨削力曲线图 5(a)可以得出,法向磨削力  $F_{gn}$  及切向磨削力  $F_{gt}$  都随磨粒切削深度  $a_p$  的增大而增大。通过公式(7)的分析可知,在其他磨削参数保持一定的情况下,单颗磨粒的切削深度  $a_p$  增大,使磨削过程中的未变形切削厚度增大,单颗磨粒去除材料的体积增大,进而导致单颗磨粒的法向磨削力  $F_{gn}$  及切向磨削力  $F_{gt}$  的变大。

(a) 磨削力随  $a_p$  的变化趋势(b) 磨削力比随  $a_p$  的变化规律图 5 磨削力及磨削力比随切削深度( $a_p$ )的变化

同时对比切向磨削力与法向磨削力的变化,可以观察到切向力始终小于法向力,这是由于 CBN 磨粒具有较大的负前角的缘故。一般将法向磨削力  $F_n$  及切向磨削力  $F_t$  的比值称为磨削力比,图 5(b)给出了仿真过程中单颗磨粒的磨削力比变化情况。观察图 5(b)可以发现,单颗磨粒的磨削力比随切削



深度  $a_p$  的增大有减小的趋势, 并且减小的趋势在逐渐放缓, 与实际情况相符, 说明了仿真结果的正确性。这些规律为生产加工中磨削参数的选取提供了较好的参考依据。

### 3.3 磨粒切削深度对磨屑形成的影响分析

磨削过程中生成的磨屑一般非常小, 在不同的磨削情况下, 磨屑的形状不同, 通常当磨粒的切削前角为负时会得到一些断裂的碎状磨屑。在磨粒形状相同时, 对比 SPH 与 FEM 方法模拟磨屑形成的过程可以发现, 在利用 SPH 方法模拟磨削过程时可以很自然的生成磨屑, 这是由于当工件材料发生大变形时, SPH 粒子之间因为没有拓扑关系可以自由的运动, 从而实现磨屑与工件材料的脱离<sup>[16]</sup>。而在用 FEM 进行模拟时会因材料变形较大产生网格畸变现象, 影响磨屑的生成。图 6 即为 SPH 法与 FEM 在模拟时的对比。

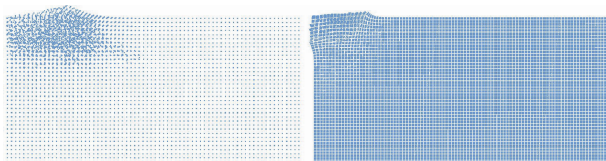


图 6 SPH 与 FEM 模拟对比

图中可以明显观察到 FEM 在模拟磨屑形成时, 随着单颗磨粒切削深度的增大, 网格变形严重影响了计算精度, 与实际情况相差太大, 造成了仿真结果的不准确。而 SPH 方法因为没有网格, 不会出现网格畸变现象, 充分说明用 SPH 方法模拟磨屑形成具有明显优势, 很好地解决了 FEM 在单颗磨粒磨削仿真时因网格畸变而影响计算精度的问题。同时, 具有这种优势的 SPH 方法更适于高速深磨过程的动态仿真分析。

磨屑的形成受多种因素的影响, 为了研究单颗磨粒切削深度对钛合金 TC4 生成磨屑的影响, 保持其他参数相同, 只改变磨粒的切削深度来进行分析比较, 仿真结果如图 7 示。

对比分析不同切削深度下的仿真结果, 图 7(a)

切削深度为  $2.5 \mu\text{m}$ , 工件材料只有滑擦, 没有磨屑产生。图 7(b)表示当切削深度为  $5 \mu\text{m}$  时滑擦作用增强, 进入耕犁阶段磨粒两侧隆起会产生毛刺, 但仍没有磨屑出现。当切削深度在  $10 \mu\text{m}$  时, 由图 7(c)可以明显观察到磨屑的出现, 说明在设定的磨削参数下, 钛合金 TC4 产生磨屑的临界切削深度在  $5 \mu\text{m}$  到  $10 \mu\text{m}$  之间, 仿真结果与理论上磨屑生成的三个过程相一致, 验证了用 SPH 法模拟单颗磨粒磨削钛合金 TC4 的可行性。通过仿真来指导实际的生产加工可以大大节省成本, 具有重要的理论意义及实用价值。

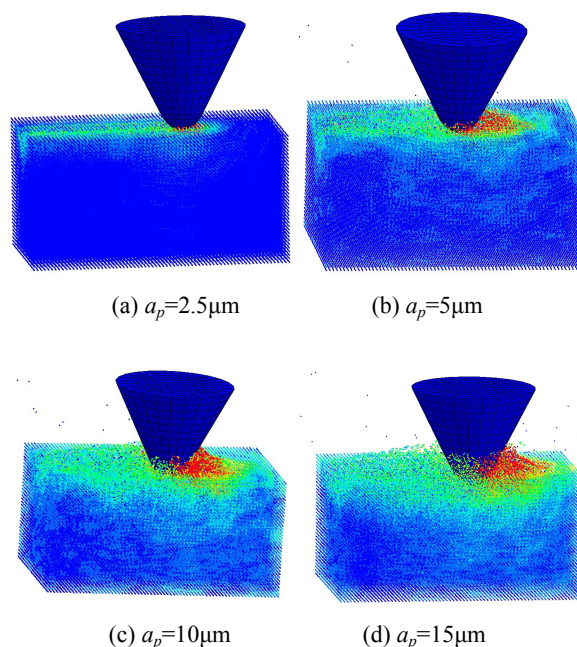


图 7 不同切削深度下磨屑生成情况

## 4 结论

以钛合金 TC4 为研究对象, 利用大型通用动力学分析软件 LS-DYNA 深入研究单颗磨粒磨削钛合金 TC4 的变形机理, 同时将 SPH 方法应用于模拟单颗磨粒的磨削过程, 得出以下结论:

(1) 建立了与真实磨粒相似、刃部有一定圆弧半径的三维磨粒模型, 比棱锥等磨粒模型的仿真结果更准确可靠。

(2) 采用 SPH 无网格法模拟磨屑的形成过程,

避免了 FEM 模拟切削大变形时网格畸变现象的发生, 从而提高计算精度, 证明了 SPH 方法用于模拟金属切削加工的可行性。

(3) 在不同切削深度下, 单颗磨粒的磨削力随磨粒切削深度的增大具有增大的趋势, 同时观察到单颗磨粒的磨削力比逐渐减小, 仿真结果与理论分析相吻合。

(4) 对切削加工进行模拟分析, 可以大大降低经济成本。在单颗磨粒的仿真分析中, 可以继续研究磨粒刃部圆弧半径大小对工件表面质量及残余应力的影响, 同时还可以进行磨削过程的热力耦合分析。

### 参考文献:

- [1] 唐昆. TC4 钛合金高效深磨工艺试验研究及其磨削质量预测 [D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [2] 任敬心, 华定安. 磨削原理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [3] 言兰, 姜峰, 融亦鸣. 基于数值仿真技术的单颗磨粒切削机理 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(11): 173-182.
- [4] 张雪萍, 王和平, 高二威. 单粒磨削过程仿真与工件表面残余应力的离散度分析 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(5): 717-721.
- [5] 程泽. 单颗磨粒高速磨削高温镍基合金机理研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [6] G R Liu, M B Liu. 光滑粒子流体动力学——一种无网格格子法 [M]. 韩旭, 杨刚, 强洪夫译. 长沙: 湖南大学出版社, 2005.
- [7] 宿崇, 许立, 刘元军, 等. 基于 SPH 法的 CBN 磨粒切削过程数值模拟 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(5): 667-671.
- [8] 段念, 王文珊, 于怡青, 等. 基于 SPH 与 FEM 耦合算法的单颗磨粒切削玻璃的动态过程仿真 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(20): 2716-2721.
- [9] N Rüttimann, M Roethlina, S Buhl, K Wegener. Simulation of Hexa-Octahedral Diamond Grain Cutting Tests Using the SPH Method [C]// 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations, 2013: 322-377.
- [10] Fang Liang, Cen Qihong, Sun Kun, et al. FEM Computation of Groove Ridge and Monte Carlo Simulation in Two-body Abrasive Wear [J]. Wear (S0043-1648), 2005, 258(1/4): 265-274.
- [11] 许庆新. 基于 SPH 方法的冲击动力学若干问题研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [12] 刘旭阳. TC4 钛合金动态本构关系研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [13] 陈敏. TC4 钛合金力学性能测试及动态材料模型研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [14] 范亚夫, 段祝平. Johnson-Cook 本构模型参数的实验测定 [J]. 力学与实践, 2003, 25(5): 40-43.
- [15] 郎献军, 何玉辉, 唐进元, 等. 基于磨粒突出高度为瑞利分布的磨削力模型 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3386-3391.
- [16] 王永刚. 超精密切削切屑形成过程的 SPH 方法模拟研究 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(23): 2861-2870.

## 《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源, 首次研制发布了 2012《中国学术期刊国际引证年报》(CAJ-IJCR 年报)。第一次给出了我国 5600 余种中外文学学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序, 发布了“中国最具国际影响力学术期刊”(排序 TOP5%)和“中国国际影响力优秀学术期刊”(排序 TOP5-10%), 在国内外学术界产生了较大反响。之后, 2013 年版年报, 将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前, 2014 版国际、国内年报与 TOP5%和 TOP5-10%期刊的遴选业已完成, 《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续 2 年被列入 TOP5%国内一流的中国最具国际影响力学术期刊, 走向世界, 进入国际一流, 指日可待!