

# 单颗磨粒切削 TC4 钛合金过程摩擦行为仿真与研究

陈振<sup>1</sup>, 赵盼<sup>2</sup>, 闫蕊<sup>1</sup>, 路丹妮<sup>3</sup>

(1. 西安航空学院 机械工程学院, 陕西 西安 710077)

(2. 西安明德理工学院 智能制造与控制技术学院, 陕西 西安 710124)

(3. 西北工业大学 航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要:**通过有限元仿真软件研究了单颗磨粒在切削 TC4 钛合金过程中的摩擦行为及其对抛光加工的影响。利用 Abaqus 软件建立了单颗磨粒切削 TC4 钛合金过程中材料的塑性变形模型, 并应用迭代自适应网格重划分技术, 准确模拟了不同摩擦系数下单颗磨粒切削 TC4 钛合金表面时的接触应力分布和塑性变形, 为优化 TC4 钛合金叶片抛光工艺提供了理论依据。研究表明, 摩擦系数对切削深度和材料堆积率有影响, 特别是在磨粒切出阶段, 摩擦系数的增加会显著促进材料在磨粒前端和两侧的堆积, 故在实际抛光加工中应合理控制摩擦系数。

**关键词:** 单颗磨粒; 有限元仿真; 塑性变形; 材料堆积率; 摩擦行为

中图分类号: TG580

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2024)02-035-06

## Simulation and Research on Friction Behavior in Single Abrasive Grain Cutting TC4 Titanium Alloy

Chen Zhen<sup>1</sup>, Zhao Pan<sup>2</sup>, Yan Rui<sup>1</sup>, Lu Danni<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Aeronautical Institute, Xi'an 710077, China)

(2. School of Intelligent Manufacturing and Control Technology, Xi'an Mingde Institute of Technology, Xi'an 710124, China)

(3. Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero-engine, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The friction behavior during the cutting of TC4 titanium alloy by single abrasive grain and its impact on polishing process were studied through finite element simulation software. The Abaqus software was used to establish a plastic deformation model during the cutting of TC4 titanium alloy by single abrasive grain, and the iterative adaptive mesh remeshing technology was applied to accurately simulate the contact stress distribution and plastic deformation under different friction coefficients, which provided a theoretical basis for optimizing the polishing process of TC4 titanium alloy blades. The analysis results reveal the impact of friction coefficient on the cutting depth and material pile-up ratio, especially during the cutting-out stage of the abrasive grain, the increase in friction coefficient significantly promotes the accumulation of material at the front end and both sides of the abrasive grain, so it is important to control the friction coefficient in actual polishing process.

**Key words:** single abrasive grain; finite element simulation; plastic deformation; material accumulation rate; friction behavior

收稿日期: 2024-02-02

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2023JCYB-431, 2023JCYB-080); 陕西省教育厅科研计划项目(23JK0495, 23JP124); 陕西省“十四五”教育科学规划课题(SGH23Q0324); 陕西高校青年创新团队项目(2022); 教育部产学研合作协同育人项目(220906280183841); 西安明德理工学院科研基金资助项目(2022XY02L04)

通信作者: 赵盼(1986—), 男, 教授。

TC4 钛合金因其卓越的力学性能和耐蚀性, 已成为制造高性能航空发动机叶片的重要材料<sup>[1-2]</sup>。然而, TC4 钛合金的高强度和强韧性也给其精密抛光加工带来了巨大挑战。传统的抛光工艺在处理钛合金类难加工材料时, 往往难以达到所需的表面质量和精度, 会直接影响航空发动机的整体性能和可靠性。因此, 深入理解并优化 TC4 钛合金的抛光工艺, 对于提升航空发动机的性

能和延长其使用寿命具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。

TC4 钛合金叶片精密抛光过程中, 磨具表面细小磨粒的切削作用是抛光过程中材料去除的基础, 通过对参与抛光的所有磨粒切削工件表面的微观创成形貌进行集成, 即可获得抛光表面的宏观创成形貌<sup>[5-6]</sup>。因此, 研究单颗磨粒的切削过程是理解复杂抛光过程的基础<sup>[7-8]</sup>。抛光过程中, 磨粒与工件表面之间的摩擦系数扮演着至关重要的角色, 直接影响着切削力的大小以及最终工件的表面质量<sup>[9]</sup>。随着磨削过程的不断进行, 摩擦作用在耕犁阶段和切屑形成阶段都得到了增强。摩擦力的变化引起工件表面温度升高, 进而影响材料的塑性变形过程。由于叶片抛光所用磨具的磨粒往往尺寸极小, 难以进行单颗磨粒划痕实验及相关物理量的测量, 因此, 为了深入了解这一过程, 可利用计算机有限元仿真软件对理想条件下单颗磨粒的切削过程进行模拟, 并分析磨粒切削工件过程中材料的塑性变形<sup>[10]</sup>。

在单颗磨粒切削有限元仿真方面, 国内外学者开展了大量的研究工作。Chen 等人<sup>[11]</sup>通过建立有限元模型模拟了单颗磨粒切削工件的材料变形, 并通过分析确定了磨削性能和可控参数之间的关系。模拟结果表明, 磨粒切出过程中推升了其正面和侧面的工件材料。He 等人<sup>[12]</sup>通过模拟单颗磨粒切削过程对砂带抛光工艺进行研究, 分析了不同加工参数下的抛光过程, 获得了不同抛光参数下单颗磨粒抛光力的变化曲线。马志飞<sup>[13]</sup>使用 Deform-3D 软件对单颗磨粒磨削 TC4 钛合金的过程进行仿真, 并分析了单颗磨粒高速磨削过程中的磨削力以及滑痕形貌。夏江等人<sup>[14]</sup>对单颗磨粒切削高温合金的过程进行有限元建模, 研究结果表明工件材料受磨粒挤压后在磨粒前面和侧面形成隆起, 之后随着磨粒切入, 大量材料沿前刀面流出, 形成磨屑, 同时侧面的材料也会被切削。李超等人<sup>[15]</sup>通过 Abaqus 仿真得到了立方氮化硼 (CBN) 磨粒切削高温合金过程中切向、法向磨削力随时间的变化曲线, 并通过计算得到了切向和法向磨削力随磨粒前角的变化曲线, 发现磨粒前角对切向磨削力和法向磨削力均有非常显著的影响。

综上所述, 抛光加工中磨粒的切削作用对改善工件表面质量有着重要作用, 对单颗磨粒切削过程的深入探究对于理解复杂抛光过程具有重要意义<sup>[16-17]</sup>。然而, 需要注意的是, 以上单颗磨粒切削仿真相关研究对 TC4 钛合金在抛光过程中的微观摩擦行为和材料切削机制的理解仍然有限, 特别是关于磨粒与工件接触过程中的应力分布、材料变形行为以及摩擦系数对抛光效果的具体影响, 现有文献中缺乏深入的定量分析。

因此, 在上述研究的基础上, 利用 Abaqus 有限元

仿真软件对单颗磨粒切削 TC4 钛合金材料过程中的塑性变形进行建模, 重点研究摩擦因素对工件表面微观变形的影响规律, 为理解 TC4 钛合金叶片抛光过程中的摩擦行为和提升工件表面质量提供理论支持。

## 1 有限元仿真模型构建

### 1.1 建模及磨粒运动路径

在 Abaqus/Standard 静态条件下进行单颗磨粒切削材料过程中材料塑性变形仿真<sup>[18]</sup>, 设计的 Abaqus 模型如图 1 所示<sup>[19]</sup>。从图 1 可以看出磨粒和工件的尺寸、位置关系。设计磨粒的运动轨迹如图 2 所示, 磨粒的起始位置在工件平面上方  $1\ \mu\text{m}$  处。

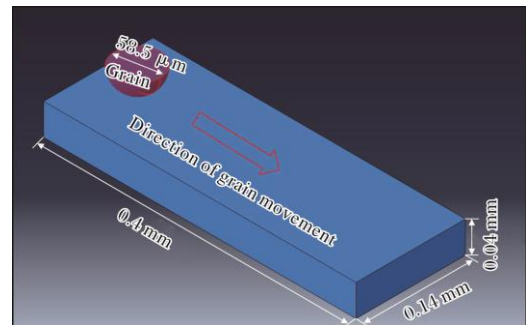


图 1 单颗磨粒切削工件的 Abaqus 模型

Fig.1 Abaqus model of single abrasive grain cutting workpiece

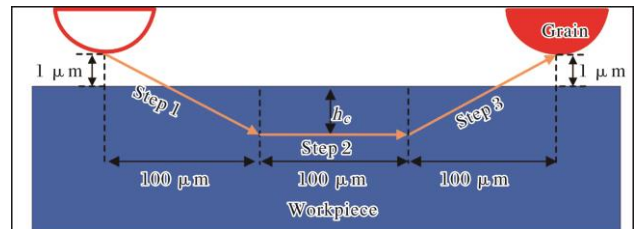


图 2 塑性变形仿真单颗磨粒运动轨迹

Fig.2 Single abrasive grain movement trajectory of plastic deformation simulation

### 1.2 工件材料及本构模型

钛合金具有密度小、强度高、比重小、耐腐蚀、耐高温等一系列优良的力学和物理性能, 被广泛应用于航空工业, 例如航空发动机风扇、压气机叶片<sup>[20-21]</sup>。选用高强度的 TC4 钛合金<sup>[22-23]</sup>作为单颗磨粒切削实验的工件材料, 其化学成分如表 1 所示。

表 1 TC4 钛合金化学成分 (w%)

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy

Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Bal.
5.5~6.5	3.5~4.5	0.08	≤0.15	≤0.10	≤0.05	≤0.01	≤0.20	0.11

Johnson-Cook 本构模型 (以下简称 J-C 本构模型) 可描述金属材料在大应变和高应变率时的材料力学行为, 且本构方程形式简单, 广泛用于金属加工仿真中材料流动应力的分析<sup>[24]</sup>。金属材料发生塑性流动的经验屈服函数如式 (1) 所示。

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{room}}{T_m - T_{room}} \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为等效应力, MPa;  $\bar{\epsilon}$  为等效塑性应变;  $\dot{\epsilon}$  为塑性应变率,  $s^{-1}$ ;  $\dot{\epsilon}_0$  为初始塑性应变率,  $s^{-1}$ ;  $A$  为准静态材料屈服强度, MPa;  $B$  为硬化模量, MPa;  $C$  为应变率相关系数;  $n$  为硬化系数;  $m$  为热软化系数;  $T$  为工件材料动态温度, K;  $T_m$  为熔化温度, K;  $T_{room}$  为环境温度, K。

TC4 钛合金 J-C 本构模型参数如表 2 所示。

表 2 TC4 钛合金 J-C 本构模型参数<sup>[10]</sup>

A/MPa	B/MPa	C	n	m
875	793	0.01	0.386	0.45

### 1.3 自适应网格重划分技术

为了确保有限元仿真分析的准确性, 磨粒与工件之间需要保持良好的接触一致性。由于接触区域中的应力梯度相对较大, 粗糙的网格可能导致仿真过程中的适应性和接触一致性较差, 因此接触区域需具有精细的网格。网格数量越多, 工件变形仿真结果将越精确, 但网格数量过多会大幅增加仿真运算时间。因此, 为了在保证仿真分析准确性的同时避免由于塑性变形导致应变率急剧增加的问题, 本研究采用了有限元分析中的自适应网格重划分技术控制单元变形<sup>[25-27]</sup>。具体来说, 根据仿真模型首次运行后磨粒-工件接触区域的应力应变情况, 利用自适应网格重划分技术对磨粒与工件接触区域网格进行细化, 而对工件其他非接触区域网格的划分则相对稀疏; 然后再次运行网格重划分后的仿真模型, 反复迭代多次, 直到获得理想的仿真运算结果。对磨粒和工件的网格划分均采用 C3D4 四节点线性四面体单元; 初始网格划分时, 磨粒使用  $5 \mu m$  网格单元, 工件使用  $10 \mu m$  网格单元。

### 1.4 材料去除过程分析方法

为了区分单颗磨粒切削材料过程的各阶段, 本研究通过量化单颗磨粒切削 TC4 钛合金工件过程中划痕横截面的材料堆积率来研究塑性变形。材料堆积率可定义为划痕两侧隆起材料总面积与切削沟槽面积之比, 较高的材料堆积率表明该过程主要由耕犁作用决定, 而较低的材料堆积率表明该过程主要由切削作用决定。划痕横

截面轮廓如图 3 所示, 其材料堆积率  $\alpha$  计算方法如式 (2) 所示。

$$\alpha = \frac{R_1 + R_2}{G} \quad (2)$$

式中,  $R_1$ 、 $R_2$  为隆起材料面积,  $G$  为切削沟槽面积。

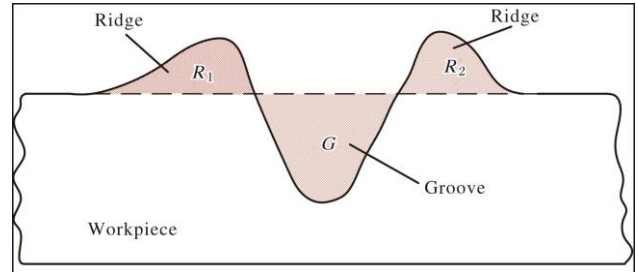


图 3 划痕横截面轮廓示意图

Fig.3 Schematic diagram of scratch cross-section profile

为了节省对划痕横截面材料堆积率的统计工作量, 在磨粒的行进路径中取 5 个位置的截面进行数据统计, 即磨粒行进路径 1/4 ( $75 \mu m$ )、1/3 ( $100 \mu m$ )、1/2 ( $150 \mu m$ )、2/3 ( $200 \mu m$ )、3/4 ( $225 \mu m$ ) 位置处。将这些位置依次标记为  $L_1 \sim L_5$ , 如图 4 所示。

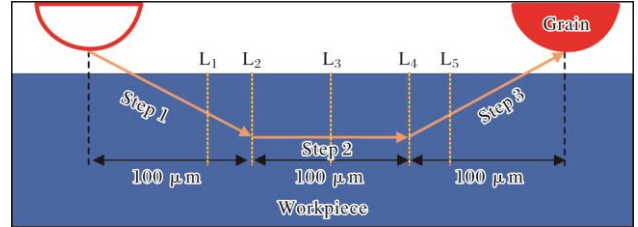


图 4 单颗磨粒行进路径标记位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of marking position of single abrasive grain path

## 2 仿真结果与分析

设置单颗磨粒 (直径  $58.5 \mu m$ ) 的水平切削速度  $v$  为  $3.5 m/s$ 、行进路径切削深度  $h_c$  为  $1 \mu m$ , 在不同摩擦系数  $\mu$  ( $0$ 、 $0.08$ 、 $0.16$ 、 $0.24$ ) 条件下进行单颗磨粒切削 TC4 钛合金过程的有限元仿真, 自适应网格重划分迭代次数设置为 3 次。不同摩擦系数下单颗磨粒切削 TC4 钛合金的仿真结果如图 5 所示。从图 5 中可以观察到最大隆起高度随着摩擦系数的增加而逐渐增大 ( $U_2$  为工件高度方向上的节点位移分量)。图 6 为不同摩擦系数下划痕  $L_4$  位置横截面的应力分布图。从图 6 可以看出, 随着摩擦系数的增加, 接触面的应力逐渐增大, 同时自适应网格分布也变得更加精细。

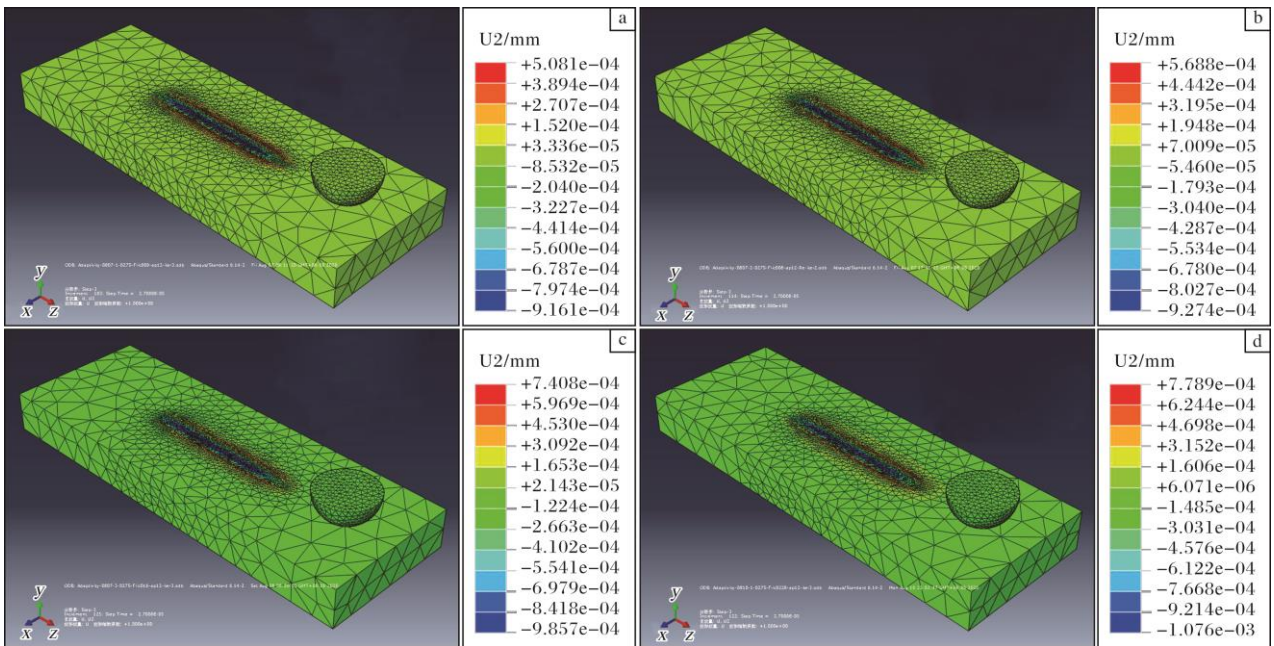


图5 不同摩擦系数下单颗磨粒切削 TC4 钛合金的仿真结果

Fig.5 Simulation results of single abrasive grain cutting TC4 titanium alloy under different friction coefficients:

(a)  $\mu=0$ ; (b)  $\mu=0.08$ ; (c)  $\mu=0.16$ ; (d)  $\mu=0.24$

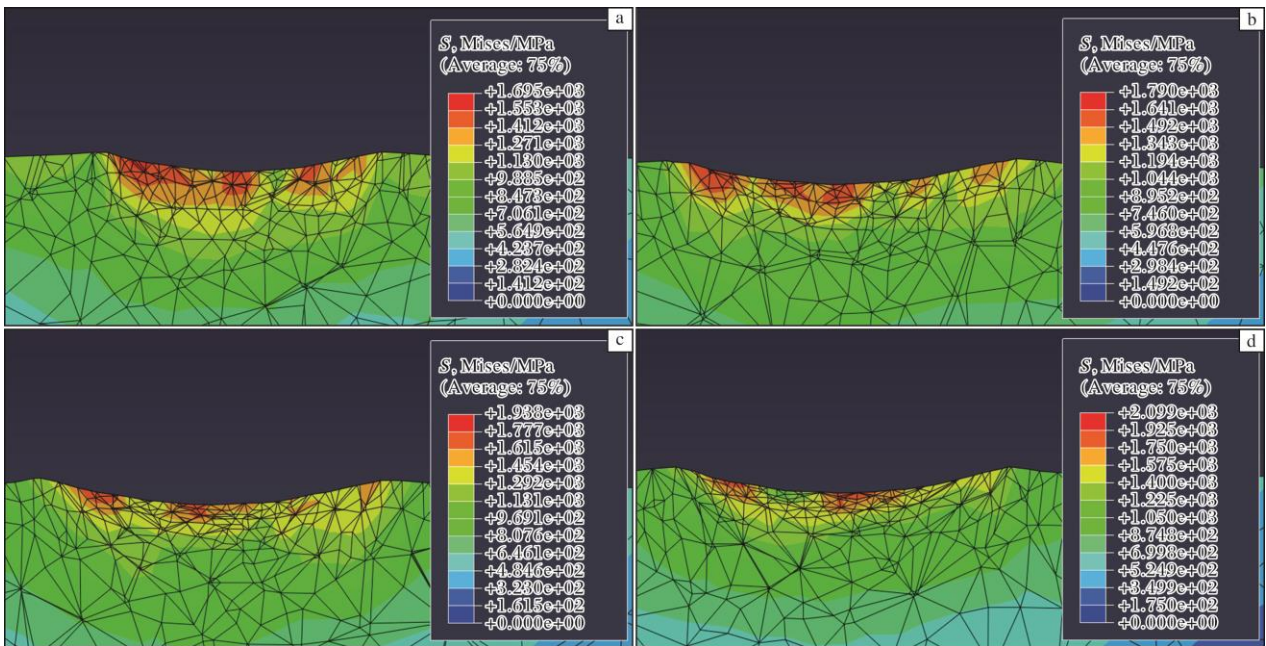


图6 不同摩擦系数下划痕 L<sub>4</sub> 位置横截面应力分布图

Fig.6 Cross-sectional stress distribution maps of scratch at the position of L<sub>4</sub> under different friction coefficients:

(a)  $\mu=0$ ; (b)  $\mu=0.08$ ; (c)  $\mu=0.16$ ; (d)  $\mu=0.24$

对 L<sub>1</sub>~L<sub>5</sub> 位置的单颗磨粒切削最大深度进行统计, 结果如图 7 所示。由图 7 可观察到, 随着摩擦系数的增加, 切削深度也随之增加。这是由于摩擦系数的增加导致磨粒与工件接触面的应力增大。对划痕 L<sub>1</sub>~L<sub>5</sub> 位置的

材料堆积率进行统计, 结果如图 8 所示。由图 8 可以观察到材料堆积率随着行进路径的增加而增大。L<sub>1</sub>~L<sub>5</sub> 位置的材料变形轮廓截面如图 9 所示。从材料堆积率和横截面轮廓来看, 摩擦系数对磨粒切入阶段的影响较

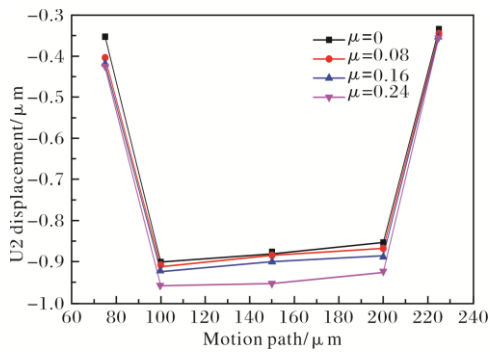


图 7 不同摩擦系数下 L<sub>1</sub>~L<sub>5</sub> 位置最大切削深度

Fig.7 Maximum cutting depth at the positions of L<sub>1</sub>~L<sub>5</sub> under different friction coefficients

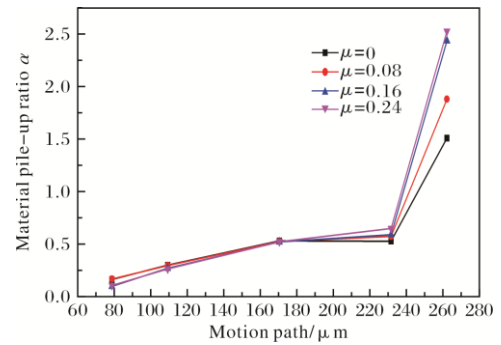


图 8 不同摩擦系数下 L<sub>1</sub>~L<sub>5</sub> 位置材料堆积率

Fig.8 Material pile-up rate at the positions of L<sub>1</sub>~L<sub>5</sub> under different friction coefficients

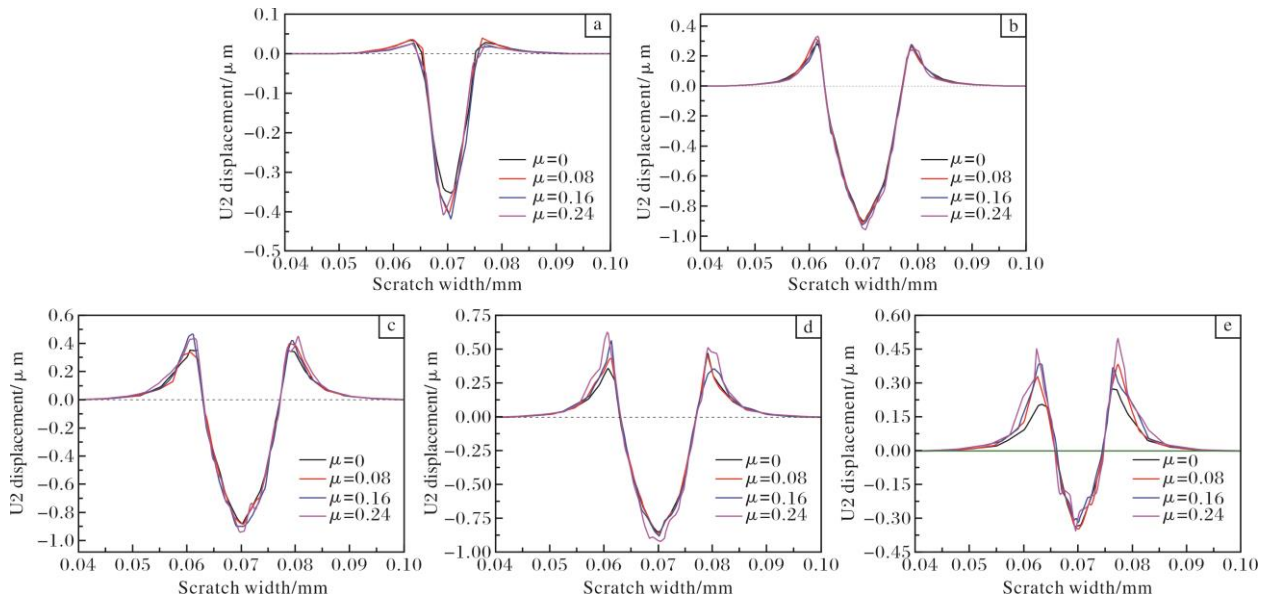


图 9 不同摩擦系数下划痕 L<sub>1</sub>~L<sub>5</sub> 位置横截面轮廓

Fig.9 Cross-sectional profiles of scratch at L<sub>1</sub>~L<sub>5</sub> positions under different friction coefficients:

(a) L<sub>1</sub> position; (b) L<sub>2</sub> position; (c) L<sub>3</sub> position; (d) L<sub>4</sub> position; (e) L<sub>5</sub> position

小，材料堆积率变化不大；而对于磨粒切出阶段而言，尽管切削沟槽深度和宽度无明显变化，但随着摩擦系数的增加，材料隆起高度明显增大，且由于磨粒前面材料的堆积和切出路径对材料的推升，材料堆积率随之增加。

综上分析，随着摩擦系数的增加，单颗磨粒对 TC4 钛合金工件的切削深度增加。单颗磨粒切削工件表面的过程中，切入和切出阶段材料变形机制是不同的，而增大摩擦系数有利于工件材料在磨粒前端和两侧不断堆积。

### 3 结 论

(1) 在 Abaqus/Standard 环境中根据单颗磨粒与工件

接触区域的应力应变，利用自适应网格重划分技术对磨粒与工件接触区域网格进行细化，获得 TC4 钛合金抛光过程中工件表面的塑性变形仿真结果。

(2) 由于摩擦系数直接影响磨粒与工件接触面的应力，故摩擦系数越大，切削深度越大。从材料堆积率和横截面轮廓来看，摩擦系数对磨粒切入阶段的影响较小，而由于磨粒前面材料的堆积和切出时对周围材料的推动效应，在连续作用和累积效应的影响下，摩擦系数对磨粒切出阶段的影响较大。

(3) 单颗磨粒切削 TC4 钛合金工件表面的过程中，切入和切出阶段材料的变形机制是不同的，增大摩擦系数有利于工件材料在磨粒前端和两侧不断堆积。

参考文献 References

- [1] 彭文雅, 吴学深, 赵春玲, 等. 中温高强 TC11 和 TC19 钛合金锻件组织与性能研究[J]. 钛工业进展, 2023, 40(6): 10-15.
- [2] 谭宇璐, 张艳梅, 卢冰文, 等. 电子束选区熔化增材制造 TiAl 合金的高温硬度及氧化行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(1): 222-229.
- [3] Yang R, Lin X J, Zhang Y, et al. Research on modeling of flexible polishing force of abrasive cloth flap wheel based on elastic-plastic deformation characteristics[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(9/10): 4793-4809.
- [4] 肖贵坚, 张友栋, 黄云, 等. 基于灰色关联法的航发叶片机器人砂带磨削精度控制技术[J]. 航空制造技术, 2020, 63(9): 63-70.
- [5] 肖贵坚, 贺毅, 黄云, 等. 基于单颗粒模型的航发叶片砂带磨削微观仿生锯齿状表面形成及实验[J]. 航空学报, 2020, 41(7): 33-42.
- [6] 张旭, 张红哲, 鲍永杰. 不同体积分数 SiC<sub>p</sub>/Al 复合材料单颗粒磨粒划切仿真与试验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(6): 2073-2083.
- [7] 吕黎曙, 邓朝晖, 岳文辉, 等. 单颗粒磨粒磨削机理与数据融合驱动的磨削过程建模分析[J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 200-215.
- [8] 范梓良. 单颗粒磨粒高速磨削 AISI 1045 钢磨削机理的仿真与实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [9] 程强. 单颗粒磨粒高速磨削 Inconel718 仿真与实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [10] 陈长征, 吴焕杰, 李滢, 等. 单颗粒金刚石磨削 SiC 陶瓷有限元仿真与分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44(2): 180-184.
- [11] Chen X, Opoz T, Oluwajobi A. Analysis of grinding surface creation by single grit approach[J]. Journal of Manufacturing and Engineering, 2017, 139(12): 1-10.
- [12] He Q W, Sun S, Wang X, et al. Research on simulation of abrasive belt polishing process for blade finishing[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 504: 12061.
- [13] 马志飞. 单颗粒磨粒高速磨削 Ti6Al4V 仿真与实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [14] 夏江, 丁文锋, 仇博, 等. 镍基高温合金高速超高速磨削成屑过程的三维仿真研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(6): 58-69.
- [15] 李超, 霍文国. 基于 ABAQUS 的单颗磨粒磨削 GH4169 高温合金有限元分析[J]. 工具技术, 2023, 57(8): 86-92.
- [16] Chen Z, Shi Y Y, Lin X J, et al. Experimental investigation of effects of polishing process on surface residual stress of TC4 blade based on sensitivity analysis[J]. Experimental Techniques, 2019, 43: 729-738.
- [17] Chen Z, Shi Y Y, Lin X J, et al. Analysis and optimization of process parameter intervals for surface quality in polishing Ti-6Al-4V blisk blade[J]. Results in Physics, 2019, 12: 870-877.
- [18] Zakeri M, Adel S A. A new method for CDP input parameter identification of the ABAQUS software guaranteeing uniqueness and precision[J]. International Journal of Structural Integrity, 2017, 8(2): 264-284.
- [19] 缪晶晶, 崔长彩, 周丽君, 等. 基于粒子群优化算法的金刚石砂轮磨粒边缘提取[J]. 图学学报, 2015, 36(2): 238-243.
- [20] 洪权, 郭萍, 周伟. 钛合金成形技术与应用[J]. 钛工业进展, 2022, 39(5): 27-32.
- [21] Chen Z, Shi Y Y, Lin X J. Enhanced material removal rate and surface quality in Ti-6Al-4V blisk blade polishing by GRA-RBF-FA method[J]. Surface Review and Letters, 2019, 26(9): 1-9.
- [22] 韩飞孝, 孙小平, 郑念庆, 等. 热加工工艺对叶片用 TC4 钛合金棒材组织与性能的影响[J]. 钛工业进展, 2022, 39(6): 7-12.
- [23] 张天任, 蒋睿嵩, 王栋辉, 等. TC4 钛合金加工表面的超声冲击强化表面完整性实验研究[J]. 机械科学与技术, 2023: 1-12. DOI: 10.13433/j.cnki.1003-8728.20230388.
- [24] Sirigiri R, Gudiga Y, Gattu S, et al. A review on Johnson Cook material model[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 3450-3456.
- [25] 王鹰宇. Abaqus 分析用户手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [26] 徐亚飞, 肖映雄, 吴宇航. 基于 Python-Abaqus 的自适应网格重划分算法实现及其应用[J]. 计算力学学报, 2023, 40(5): 807-814.
- [27] 徐亚飞. 基于 Python-Abaqus 的自适应有限元法及其应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.