

基于位错密度的Ti-6Al-4V合金表面机械碾磨晶粒细化模型及工艺优化

付正帆¹, 邱敬文^{1,2,3,4*}, 胡忠举^{1*}, 颜建辉², 刘春轩³, 肖务里⁴

¹湖南科技大学, 机电工程学院, 湖南 湘潭

²湖南科技大学, 新能源储存与转换先进材料湖南省重点实验室, 湖南 湘潭

³湖南金天铝业高科技股份有限公司, 湖南 泸溪

⁴平安电气股份有限公司, 湖南 湘潭

Email: fuzhengfan95@163.com, *Jingwen.Qiu@hnust.edu.cn, *zhu@hnust.edu.cn

收稿日期: 2021年3月1日; 录用日期: 2021年4月1日; 发布日期: 2021年4月8日

摘要

基于Johnson-Cook本构模型, 采用Abaqus有限元分析软件, 建立了Ti-6Al-4V钛合金表面机械碾磨工艺的二维有限元仿真模型, 并将其与位错密度演化模型进行耦合, 实现了对表面机械碾磨过程中受力情况与微观晶粒细化动态演变的仿真模拟。基于仿真结果, 对钛合金表面机械碾磨过程中的残余应力场、应变场、位错密度和晶粒尺寸的变化规律进行了研究, 得到了碾磨速度和单道次碾磨深度两种工艺参数对钛合金表面机械碾磨过程中晶粒细化程度的影响规律, 为钛合金表面机械碾磨处理工艺参数的优化提供了有利参考。

关键词

Ti-6Al-4V, 表面机械碾磨处理, 有限元模拟, 晶粒尺寸

Grain Refinement Modeling Based on Dislocation Density and Optimization for Surface Mechanical Grinding Treatment of Ti-6Al-4V Alloy

Zhengfan Fu¹, Jingwen Qiu^{1,2,3,4*}, Zhongju Hu^{1*}, Jianhui Yan², Chunxuan Liu³, Wuli Xiao⁴

¹School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Hunan Provincial Key Laboratory of Advanced Materials for New Energy Storage and Conversion, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

*通讯作者。

文章引用: 付正帆, 邱敬文, 胡忠举, 颜建辉, 刘春轩, 肖务里. 基于位错密度的 Ti-6Al-4V 合金表面机械碾磨晶粒细化模型及工艺优化[J]. 材料科学, 2021, 11(4): 281-290. DOI: 10.12677/ms.2021.114034

³Hunan Gold-Sky Aluminum Industry High-Tech Co., Ltd., Luxi Hunan⁴Pingan Electric Co., Ltd., Xiangtan Hunan

Email: fuzhengfan95@163.com, *Jingwen.Qiu@hnust.edu.cn, *zjhu@hnust.edu.cn

Received: Mar. 1st, 2021; accepted: Apr. 1st, 2021; published: Apr. 8th, 2021

Abstract

Abaqus commercial finite element analysis software is used to establish a two-dimensional finite element simulation model of Ti-6Al-4V titanium alloy surface mechanical grinding process based on the Johnson-Cook constitutive model. The model is coupled with dislocation density evolution model to simulate the dynamic evolution of the macroscopic force and the microscopic grain refinement during the surface mechanical grinding treatment. Based on the simulation results, the changes in the residual stress field, strain field, dislocation density and grain size during the mechanical grinding of the titanium alloy surface were studied. The influence of two process parameters, grinding speed and single-pass grinding depth, on the degree of grain refinement during mechanical grinding of the titanium alloy surface is obtained. It provides a favorable reference for the optimization of the process parameters of the mechanical grinding treatment of the titanium alloy surface.

Keywords

Ti-6Al-4V, Surface Mechanical Grinding Treatment, Finite Element Simulation, Grain Size

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

表面自纳米化技术是一种新兴的表面强化技术，其基本原理是通过在材料表面反复施加大应变，使得表层晶粒逐渐细化至纳米级。根据 Hall-Petch 关系式，材料的强度或硬度随晶粒尺寸的减小而提高。因此，表面的纳米晶可以提高材料表面的硬度和耐磨性。该技术自提出以来已经被广泛应用于钛、铜、铝等各类金属与合金的表面硬化处理当中[1] [2] [3] [4]。常用的实现表面自纳米化的工艺有表面机械研磨处理(Surface mechanical attrition treatment, SMAT)、高能喷丸(High energy shot peening, HESP)和表面机械碾磨处理(Surface mechanical grinding treatment, SMGT)等[5] [6] [7]。相比于 SMAT 和 HESP 这两种工艺，SMGT 具有工艺实现难度低、效率高等优点成为近年来表面自纳米化工艺的研究热点之一。其工艺原理是通过半球形刀头对旋转的材料表面施加外力，使其表面产生剧烈塑性变形，进而生成大量的位错、孪晶、层错等晶体缺陷，最终使得表层粗晶组织逐渐细化至纳米级[8]。

Ti-6Al-4V (TC4)钛合金具有优良的力学性能、组织稳定性和热稳定性良好等优点，已成为目前应用最广泛的钛合金材料之一。但是 TC4 钛合金耐磨性能较差的问题也限制了其应用[9]。SMGT 工艺为提高 TC4 钛合金的耐磨性能提供了一个有效途径。一般研究材料的 SMGT 工艺往往采用实验法，但钛合金的试验成本较高且试验周期较长。本文采用效率较高、成本较低并且较直观的有限元分析方法，利用 Abaqus 商业有限元软件将 Johnson-Cook 本构模型与位错密度演化模型进行耦合，对 SMGT 过程中钛合金位错密

度和晶粒尺寸动态演变进行仿真，研究在 SMGT 过程中碾磨速度和单道次碾磨深度这两种工艺参数对 TC4 钛合金表面微观组织的影响规律，对后续的 TC4 合金 SMGT 工艺设计和优化具有积极的指导意义。

2. 有限元模型建立及仿真试验参数设定

2.1. Johnson-Cook 材料本构模型及相关参数设定

材料的流动应力本构模型是用来描述材料的力学性质，表征材料变形过程中的动态响应的函数。在有限元仿真中材料的宏观组织一般被设定为致密均匀的，材料的流动应力主要受到变形程度、变形速度和变形温度等因素的影响。本文采用的 Johnson-Cook 流动应力本构模型，该模型可用于描述大应变、高应变速率下金属材料的强度极限[10]，其表达式如式(1)所示：

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

式中 $\bar{\sigma}$ 为等效流动应力，其值由该公式计算得出； $\bar{\varepsilon}$ 为等效塑性应变， $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 为等效塑性应变速率， T 为材料的瞬时温度，以上均为有限元仿真计算中的变量； $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ 为参考塑性应变速率，一般根据仿真的加工工艺来确定； T_{melt} 为材料熔点， T_0 为初始温度，一般根据仿真的加工环境温度确定； A 、 B 、 C 、 n 和 m 是材料常数，可根据材料的拉压扭转实验拟合获得。TC4 钛合金的 Johnson-Cook 本构模型相关参数及其意义如表 1 所示，TC4 钛合金的材料性能参数如表 2 所示。

Table 1. Johnson-Cook material flow stress constitutive model parameters of TC4 titanium alloy [11]

表 1. TC4 钛合金的 Johnson-Cook 材料流动应力本构模型参数[11]

| A 初始屈服应力 (MPa) | B 硬化系数 (MPa) | n 加工硬化指数 | C 应变速率系数 | m 温度软化系数 |
|----------------|--------------|----------|----------|----------|
| 782 | 498 | 0.028 | 0.28 | 1 |

Table 2. Material performance parameters of TC4 titanium alloy [12]

表 2. TC4 钛合金的材料性能参数[12]

| 材料 | 密度 ρ (kg/m ³) | 弹性模量 E (GPa) | 泊松比 ν | 导热系数 λ (W/m·K) | 比热容 C (J/kg·K) |
|-----|--------------------------------|----------------|-----------|------------------------|------------------|
| TC4 | 4430 | 109 | 0.34 | 6.8 | 611 |

2.2. 基于位错理论的晶粒演化模型及相关参数设定

Estrin [13]等人提出了一组微分方程来预测材料大应变速率条件下加工过程中位错密度的演化速率。该方程与在不同应变，应变速率和温度条件下开发的材料本构模型兼容，并且已经适应于具有高应变速率的其他变形过程的建模，例如铜、铝和钛等金属材料的机械加工[14] [15]。

在该模型中，假定材料在变形过程中形成了位错单元结构，该结构由位错单元壁和单元内芯两个部分组成，并遵守混合规则。模型中区分出不同类型的位错密度：胞内位错(ρ_w)和胞壁位错(ρ_c)，材料在加工过程中两种类型的位错密度演变公式如下所示：

$$\dot{\rho}_c = \alpha^* \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{\rho_w}}{b} \dot{\gamma}_w^r - \beta^* \frac{6\dot{\gamma}_c^r}{bd\sqrt[3]{1-f}} - k_0 \left(\frac{\dot{\gamma}_c^r}{\dot{\gamma}_0} \right)^n \dot{\gamma}_c^r \rho_c \quad (2)$$

$$\dot{\rho}_w = \frac{6\beta^* \dot{\gamma}_c^r \sqrt[3]{1-f}}{bdf} + \frac{\sqrt{3}\beta^* \dot{\gamma}_c^r (1-f) \sqrt{\rho_w}}{fb} - k_0 \left(\frac{\dot{\gamma}_w^r}{\dot{\gamma}_0} \right)^n \dot{\gamma}_w^r \rho_w \quad (3)$$

式(2)和(3)等号右边三项依次代表弗兰克-里德(Frank-Read)位错源引起的位错增殖、胞内位错向胞壁位错的转化以及动态恢复导致的位错湮灭。其中 α^* 代表有效位错源比例因子, β^* 为位错分数, k_0 为常数, n 是温度敏感系数, f 是胞壁位错的体积分数, b 是材料的 Burgers 向量的大小, d 是晶粒尺寸, $\dot{\gamma}'_c$ 和 $\dot{\gamma}'_w$ 分别是晶界和晶胞内部的解析剪切应变率, 而 $\dot{\gamma}'_0$ 是参考解析剪切应变率。该模型假设晶界和晶胞内部的分切应变率与等效剪切应变率相等, 即:

$$\dot{\gamma}'_c = \dot{\gamma}'_w = \dot{\gamma}' \quad (4)$$

式(4)满足沿着内部和边界之间的界面的应变相容性。解析剪切应变率 $\dot{\gamma}'$ 可以通过 Von Mises 应变率 $\dot{\epsilon}$, 通过等式(4)来计算, 其中 M 是泰勒因子。

$$\dot{\gamma}' = M \dot{\epsilon} \quad (5)$$

胞壁位错的体积分数 f , 总位错密度 ρ_{total} 和晶粒尺寸 d 由下式确定:

$$f = f_\infty + (f_0 - f_\infty) e^{-\left(\frac{\gamma^r}{\dot{\gamma}'^r}\right)} \quad (6)$$

$$\rho_{total} = f \rho_w + (1 - f) \rho_c \quad (7)$$

$$d = \frac{K}{\sqrt{\rho_{total}}} \quad (8)$$

式(6)中, f_∞ 是位错胞壁饱和体积分数, f_0 是位错胞壁初始体积分数, γ^r 是剪切应变, $\dot{\gamma}'_0$ 是参考剪切应变; 式(8)中 K 为常数。

该模型的参数可以分为两类: 一类是有材料自身属性和初始微观组织结构决定的, 例如 TC4 钛合金的初始位错密度、初始晶粒尺寸和伯氏矢量等; 另一类是控制材料位错密度在加工过程中演变的参数, 如 α^* 、 β^* 和 k_0 等。根据 SMGT 实验得出的晶粒尺寸数据, 本文拟合出这两类位错密度模型参数如表 3 和表 4 所示。

Table 3. Material property parameters

表 3. 材料属性参数

| 材料 | d (mm) | ρ_w (mm ⁻²) | ρ_c (mm ⁻²) | b (nm) | f_0 | f_∞ |
|-----|--------------------|------------------------------|------------------------------|----------|----------------------|--------------------|
| TC4 | 1×10^{-2} | 1×10^7 | 1×10^8 | 2.86 | 2.5×10^{-1} | 6×10^{-2} |

Table 4. Dislocation density model parameters

表 4. 位错密度模型参数

| 材料 | k_0 | α^* | β^* | n | M | K |
|-----|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------|------|-----|
| TC4 | 4×10^{-1} | 6×10^{-2} | 2.3×10^{-3} | 5×10^1 | 3.06 | 90 |

2.3. SMGT 模型建立及仿真试验参数设定

本文采用 Abaqus 有限元仿真软件对 TC4 样品和碾磨刀具进行二维建模。如图 1(a)所示, TC4 样品模型尺寸为 30 mm × 10 mm。碾磨刀具为直径 Φ20 mm 的半球形刀头, 材质为硬质合金材料, 其密度 $\rho = 14,600 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.22$ 。本文运用软件内的用户定义子程序 vumat, 通过 Python 语言编程, 将位错理论方程与 Johnson-Cook 材料流动应力本构模型进行耦合, 从而实现了对 TC4 钛合金 SMGT 过程进行有限元模拟。运用 Abaqus/Expilict 6.13 热-力耦合求解器进行仿真; 采用工件固

定、刀具移动的方式，在工件底部设置位移约束来限制工件位移如图 1(b)；设定模拟开始时的环境温度、刀具温度和工件温度均为 20℃。表面机械碾磨仿真试验参数如表 5 所示。

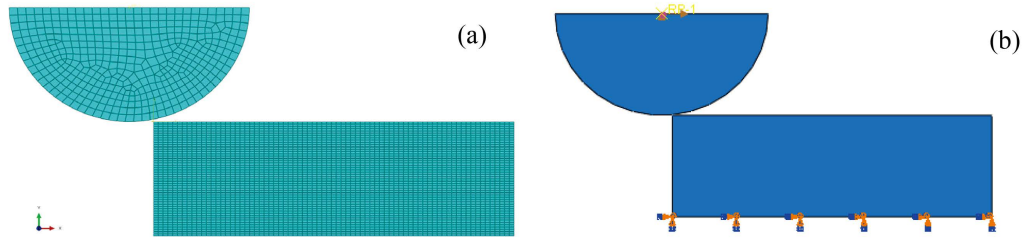


Figure 1. TC4 titanium alloy SMGT modeling: (a) TC4 titanium alloy SMGT two-dimensional model; (b) Model displacement constraints

图 1. TC4 钛合金 SMGT 建模: (a) TC4 钛合金 SMGT 二维模型; (b) 模型位移约束

Table 5. TC4 titanium alloy SMGT simulation test parameters

表 5. TC4 钛合金 SMGT 仿真试验参数

| 试验编号 | 碾磨速度 v (m/s) | 单道次碾磨深度 D ($\mu\text{m}/\text{pass}$) | 总碾磨深度 (μm) |
|------|-------------------|----------------------------------------------|----------------------------|
| 1 | 0.1 | 10 | |
| 2 | 0.1 | 20 | |
| 3 | 0.1 | 30 | |
| 4 | 0.2 | 10 | |
| 5 | 0.2 | 20 | 240 |
| 6 | 0.2 | 30 | |
| 7 | 0.3 | 10 | |
| 8 | 0.3 | 20 | |
| 9 | 0.3 | 30 | |

3. 仿真结果分析与讨论

图 2(a)~(c)为 TC4 钛合金 SMGT 仿真示意图，图中的彩色云图代表样品在 SMGT 过程中的受力情况以及经过 SMGT 加工后材料的残余应力。半球形碾磨刀头以如图 2(a)所示的方向前进，TC4 钛合金样品在刀头的挤压下先发生弹性变形，当刀头施加给材料的应力超过了材料的弹性极限时，材料发生塑性流动；在刀头前进过程中刀头前端出现材料的堆积，随着刀头的继续前进，前端堆积的材料一部分会从刀头下方流动，另一部分继续保留在刀头前端，如图 2(b)放大区域所示；当刀头到达运行终点后退刀，重新开始下一道次的碾磨，如图 2(c)所示。图 2(d)是经过 SMGT 加工后材料残余应力云图，其中黑色方框 1 处是材料碾磨变形层，而方框右侧红色云图应力集中区域是由于材料在碾磨过程中材料流动堆积所导致的。为了对比不同工艺参数条件下材料碾磨层的残余应力和应变情况，选取了图 2(d)黑色方框 1 处的 64 个单元作为分析对象。

3.1. 残余应力场分析

在 SMGT 过程中样品表面强烈塑性变形不仅导致了晶粒细化还会在材料表层保留一定的残余压应力，而残余压应力有利于提高材料的抵抗裂纹扩张的能力[16]，图 3 为采用 9 组不同工艺参数的 TC4 钛合金 SMGT 残余应力场仿真结果，左侧图例中 S. Mises 代表 Von Mises 应力，是基于剪切应变能的一种

等效应力; Avg75%代表当节点相对变化率小于该值时, 该节点的结果被平均, 是一种平滑云图的算法。由图 3 可以观察到样品材料经过 SMGT 后在碾磨层下方和刀头行程终点前端材料堆积处都有较大的残余应力, 其中最大值出现在图 3(a)黑色箭头所指处, 为 $1.043 \times 10^9 \text{Pa}$ 。选取图 2(d)所示的 64 个碾磨变形层单元格, 计算出 9 组 SMGT 工艺参数条件下碾磨层的平均残余应力, 如图 4 所示, 由图可知在工艺参数为碾磨速度 $v = 0.1 \text{ m/s}$, 单道次碾磨深度 $D = 10 \mu\text{m/pass}$ 条件下碾磨层的平均残余值应力最大, 为 $7.233 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。结合图 3 和图 4 的仿真结果, 可以得出以下结论: 当碾磨速度 v 一定时, 单道次碾磨深度 D 越大, 样品碾磨层的平均残余应力越小; 当单道次碾磨深度 D 一定时, 碾磨速度 v 与样品碾磨层的平均残余应力同样呈现负相关性。

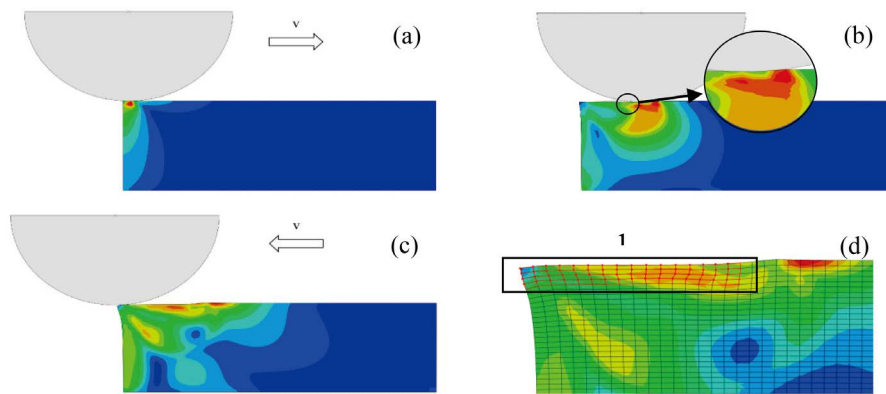
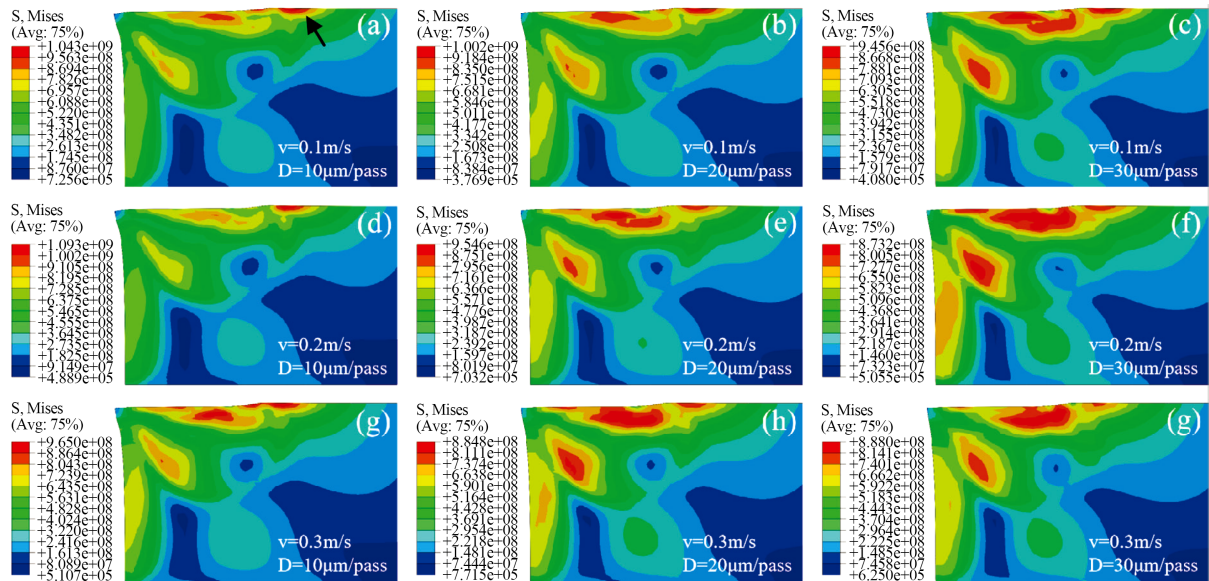


Figure 2. Finite element simulation of SMGT process of TC4 titanium alloy: (a) Grinding tool cut in; (b) Single pass grinding end point; (c) Retract; (d) Selected 64 grinding deformation layer units

图 2. 有限元模拟 TC4 钛合金 SMGT 过程: (a) 碾磨刀头切入; (b) 单道次碾磨终点; (c) 碾磨结束退刀; (d) 选取的 64 个碾磨变形层单元



(a) $v = 0.1 \text{ m/s}$, $D = 10 \mu\text{m/pass}$; (b) $v = 0.1 \text{ m/s}$, $D = 20 \mu\text{m/pass}$; (c) $v = 0.1 \text{ m/s}$, $D = 30 \mu\text{m/pass}$; (d) $v = 0.2 \text{ m/s}$, $D = 10 \mu\text{m/pass}$; (e) $v = 0.2 \text{ m/s}$, $D = 20 \mu\text{m/pass}$; (f) $v = 0.2 \text{ m/s}$, $D = 30 \mu\text{m/pass}$; (g) $v = 0.3 \text{ m/s}$, $D = 10 \mu\text{m/pass}$; (h) $v = 0.3 \text{ m/s}$, $D = 20 \mu\text{m/pass}$; (i) $v = 0.3 \text{ m/s}$, $D = 30 \mu\text{m/pass}$.

Figure 3. The residual stress field cloud diagram of SMGT simulation results with different process parameters, grinding speed v (m/s), Single pass grinding depth D ($\mu\text{m/pass}$)

图 3. 不同工艺参数 SMGT 仿真结果残余应力场云图, 碾磨速度 v (m/s), 单道次碾磨深度 D ($\mu\text{m/pass}$)

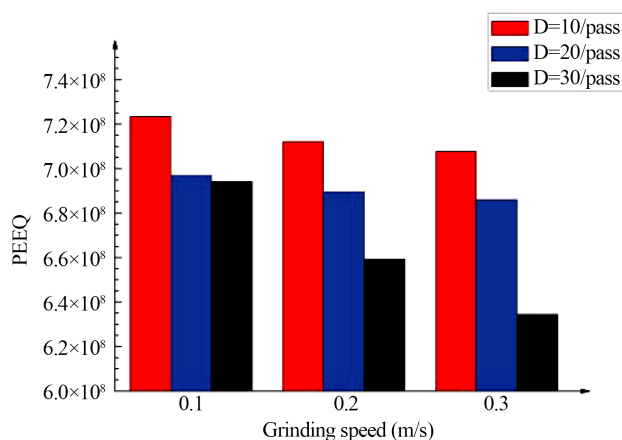


Figure 4. Average residual stress of the grinded layer after SMGT with different process parameters

图 4. 不同工艺参数 SMGT 后研磨层平均残余应力

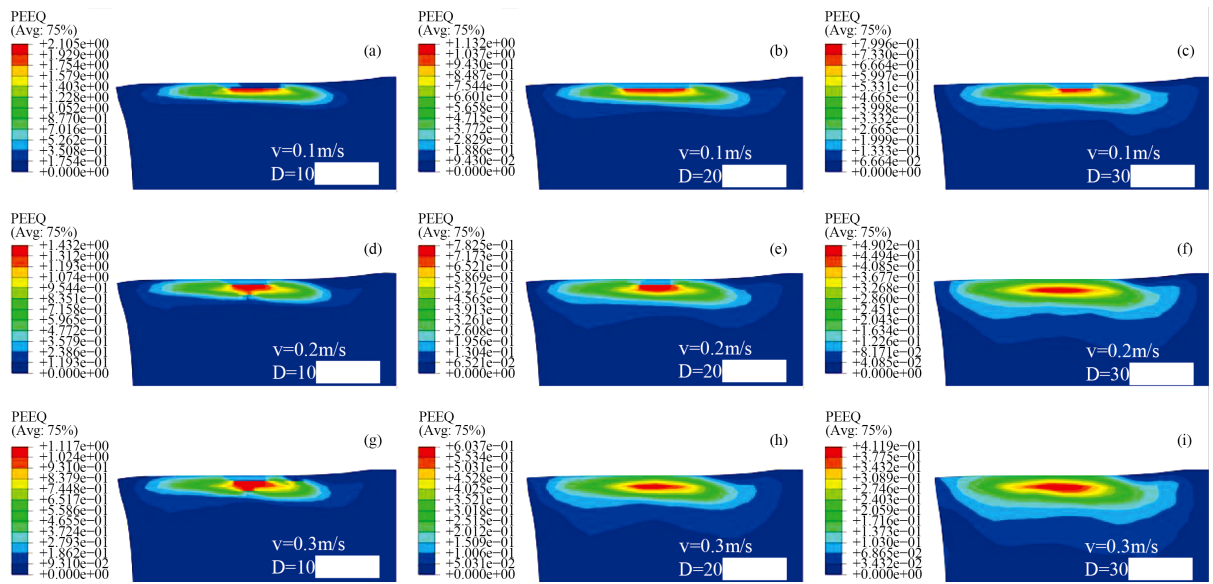
3.2. 应变场分析

图 5 是 9 组不同工艺参数条件下 TC4 钛合金经过 SMGT 后的等效应变场云图,由图 5 可知经过 SMGT 后材料的等效塑性应变主要集中于研磨区域表层以下。如图 5(a)所示,当研磨速度 $v = 0.1$ m/s,单道次研磨深度 $D = 10$ $\mu\text{m}/\text{pass}$ 条件下得到的等效应变值最大,达到了 2.105;而研磨速度 $v = 0.3$ m/s,单道次研磨深度 $D = 30$ $\mu\text{m}/\text{pass}$ 条件下得到的等效应变值最小,仅为 0.412,如图 5(i)所示。横向对比图 5 中研磨速度 v 相同的条件下的应变场分布图,如图 5(a)、图 5(b)和图 5(c),可以得到单道次研磨深度 D 的大小与 TC4 钛合金的应变程度成负相关性;而与应变区域范围成正相关性的规律,即在研磨速度 v 相同的条件下单道次研磨深度 D 越大,材料变形层的等效塑性应变越小,但是材料变形层的应变区域却随单道次研磨深度 D 的增大而增大。纵向对比图 5 中单道次研磨深度 D 相同的条件下的应变场分布图,如图 5(a)、图 5(d)和图 5(g),可知研磨速度 v 的大小也与 TC4 钛合金的应变程度成负相关性,而与应变区域范围成正相关性的规律,这与横向对比的影响规律相同。为了更直观地对比不同工艺参数对材料变形层等效应变大小的影响规律,选取如图 2(d)所示的 64 个单元格,提取出 9 组不同工艺参数 SMGT 仿真等效应变数据求平均值,如图 6 所示,图中横坐标是研磨速度 v ,纵坐标是平均等效塑性应变值。由图可以发现:在研磨速度 v 相同的条件下,等效应变值随单道次研磨深度 D 的增大而减小;在单道次研磨深度 D 相同的条件下,等效应变值随研磨速度 v 的增大而减小。

3.3. 位错密度和晶粒尺寸演变分析

图 7(a)和图 7(b)为第 1 组工艺参数条件下通过位错密度方程计算得出的经过 SMGT 后材料变形层的位错密度和晶粒尺寸仿真云图。选取如图 2(d)中研磨层的 64 个单元格,可以得到在 SMGT 过程中研磨层的平均位错密度和平均晶粒尺寸演化数据如图 8 所示。图中横坐标为研磨道次,纵坐标为位错密度或晶粒尺寸,可以观察到 TC4 钛合金在 SMGT 过程中位错密度随研磨道次的增加而逐渐增大,晶粒则逐渐细化,且在总研磨深度不变的条件下,前 1/3 的研磨道次时位错密度的变化量不大,后 2/3 的研磨道次时位错密度才逐渐提高。图 8(a)和图 8(b)是在单道次研磨深度 $D = 10$ $\mu\text{m}/\text{pass}$,研磨速度 $v = 0.1$ m/s、0.2 m/s 和 0.3 m/s 的条件下得到的平均位错密度和平均晶粒尺寸演变仿真结果,经过表面机械研磨后 TC4 表面变形层的平均位错密度分别为 $4.16 \times 10^{15} \text{ mm}^{-2}$ 、 $3.72 \times 10^{15} \text{ mm}^{-2}$ 和 $3.39 \times 10^{15} \text{ mm}^{-2}$,平均晶粒尺寸分别为 27.3 nm、28.8 nm 和 30.2 nm。通过图 8 可知,本次模拟试验中都存在着相似的规律,即在总研磨深度

一定的条件下，单道次研磨深度 D 和研磨速度 v 越小则材料研磨层的平均位错密度越大，平均晶粒尺寸也越小，该结论与丁利强[17]对铝合金高速切削模拟试验中得到的结论相同。在工艺参数为 $v = 0.1$ m/s, $D = 10$ $\mu\text{m/pass}$ 的条件下仿真结果中平均位错密度最大，达到 $4.16 \times 10^{15} \text{ mm}^{-2}$ ，平均晶粒尺寸为 27.3 nm，而工艺参数为 $v = 0.3$ m/s, $D = 30$ $\mu\text{m/pass}$ 时由图 8(f)所示，其平均位错密度最小，为 $1.78 \times 10^{14} \text{ mm}^{-2}$ ，平均晶粒尺寸为 131.8 nm，比最大位错密度低一个数量级。研磨速度为 $v = 0.1$ m/s 和 0.2 m/s 的 6 种模拟预测结果晶粒尺寸均在 100 nm 以下。根据仿真结果分析，TC4 钛合金 SMGT 工艺参数在 $v = 0.1$ m/s, $D = 10$ $\mu\text{m/道次}$ 时，晶粒细化程度最高。综上所述，单道次研磨深度 D 和研磨速度 v 对 TC4 钛合金表面纳米晶层的形成都有影响，且呈负相关性。



(a) $v = 0.1$ m/s, $D = 10$ $\mu\text{m/pass}$; (b) $v = 0.1$ m/s, $D = 20$ $\mu\text{m/pass}$; (c) $v = 0.1$ m/s, $D = 30$ $\mu\text{m/pass}$; (d) $v = 0.2$ m/s, $D = 10$ $\mu\text{m/pass}$; (e) $v = 0.2$ m/s, $D = 20$ $\mu\text{m/pass}$; (f) $v = 0.2$ m/s, $D = 30$ $\mu\text{m/pass}$; (g) $v = 0.3$ m/s, $D = 10$ $\mu\text{m/pass}$; (h) $v = 0.3$ m/s, $D = 20$ $\mu\text{m/pass}$; (i) $v = 0.3$ m/s, $D = 30$ $\mu\text{m/pass}$.

Figure 5. Equivalent strain field cloud diagram of SMGT simulation results with different process parameters, grinding speed v (m/s), single pass grinding depth D ($\mu\text{m/pass}$)

图 5. 不同工艺参数 SMGT 仿真结果等效应变场云图，研磨速度 v (m/s)，单道次研磨深度 D ($\mu\text{m/pass}$)

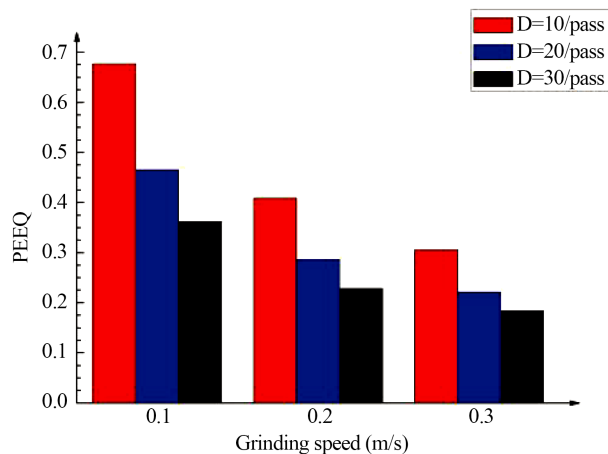


Figure 6. The average equivalent strain of the grinding layer after SMGT with different process parameters

图 6. 不同工艺参数 SMGT 后研磨层平均等效应变

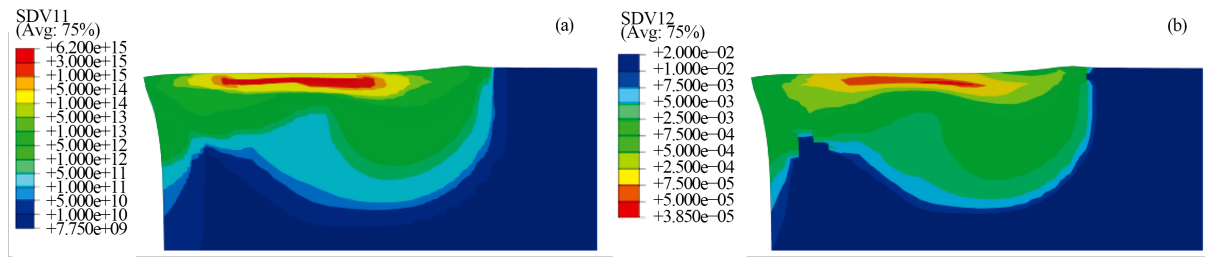


Figure 7. The process parameter is $v = 0.1$ m/s, $D = 10$ $\mu\text{m}/\text{pass}$ SMGT simulation cloud diagram: (a) Dislocation density; (b) Grain size

图 7. 工艺参数为 $v = 0.1$ m/s, $D = 10$ $\mu\text{m}/\text{pass}$ 时 SMGT 仿真云图: (a) 位错密度; (b) 晶粒尺寸

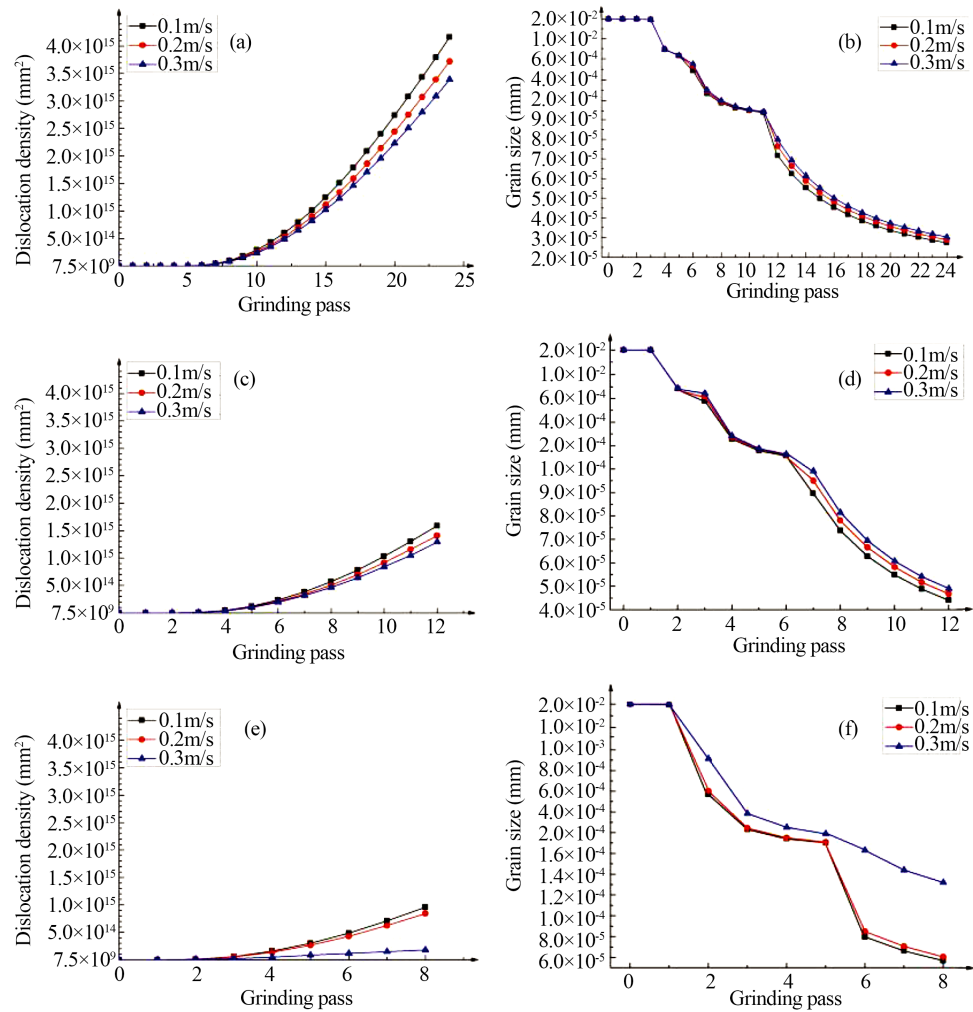


Figure 8. Evolution of dislocation density and grain size in SMGT process of TC4 titanium alloy: (a) (b) Single pass grinding depth $D = 10$ $\mu\text{m}/\text{pass}$; (c) (d) Single pass grinding depth $D = 20$ $\mu\text{m}/\text{pass}$; (e) (f) Single pass grinding depth $D = 30$ $\mu\text{m}/\text{pass}$

图 8. TC4 钛合金 SMGT 过程中的位错密度和晶粒尺寸演化: (a) (b) 单道次碾磨深度 $D = 10$ $\mu\text{m}/\text{pass}$; (c) (d) 单道次碾磨深度 $D = 20$ $\mu\text{m}/\text{pass}$; (e) (f) 单道次碾磨深度 $D = 30$ $\mu\text{m}/\text{pass}$

4. 结论

建立了适合 TC4 钛合金表面机械碾磨模型, 实现了材料变形层位错密度和晶粒尺寸在碾磨过程中动

态演化的仿真模拟。通过对 9 组不同工艺参数条件下的仿真结果进行对比得到了以下结论:

1) 碾磨速度和单道次碾磨深度对表面纳米强化层晶粒的细化均有影响,在相同总碾磨深度速度的条件下碾磨越慢、单道次碾磨深度越浅,则表面纳米强化层的晶粒细化越高。

2) 该模型成功模拟了表面机械碾磨处理过程中碾磨层的位错密度和晶粒尺寸的演变过程,为表面机械碾磨处理在钛合金上的应用提供了一定的参考。

基金项目

国家自然科学基金(项目号: 51604112), 湖南省自然科学基金(项目号: 2017JJ3089), 湖湘青年英才(项目号: 2019RS2067), 湖南省战略性新兴产业科技攻关与重大科技成果转化项目(项目号: 2019GK4048) 和湘潭市企业科技特派员项目。

参考文献

- [1] 刘研蕊. 钛及钛合金表面纳米化及其表面组织性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- [2] Che, Z., Yang, J., Gong, S., Cao, Z., Zou, S. and Xu, H. (2014) Self-Nanocrystallization of Ti-6Al-4V Alloy Surface Induced by Laser Shock Processing. *Rare Metal Materials and Engineering*, **43**, 1056-1060. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(14\)60100-4](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(14)60100-4)
- [3] Li, W.L., Tao, N.R. and Lu, K. (2008) Fabrication of a Gradient Nano-Micro-Structured Surface Layer on Bulk Copper by Means of a Surface Mechanical Grinding Treatment. *Scripta Materialia*, **59**, 546-549. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.05.003>
- [4] 康燕平, 李元东, 王晓东, 高坤. 镁、铝合金表面自纳米化研究现状[J]. 材料导报, 2011, 25(23): 20-24.
- [5] Lu, K. and Lu, J. (2004) Nanostructured Surface Layer on Metallic Materials Induced by Surface Mechanical Attrition Treatment. *Materials Science and Engineering: A*, **375-377**, 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.261>
- [6] Bagherifard, S., Fernández Pariente, I., Ghelichi, R. and Guagliano, M. (2010) Fatigue Properties of Nanocrystallized Surfaces Obtained by High Energy Shot Peening. *Procedia Engineering*, **2**, 1683-1690. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.181>
- [7] Zhao, K., Liu, Y., Yao, T., Liu, B. and He, Y. (2016) Surface Nanocrystallization of Ti-45Al-7Nb-0.3W Alloy Induced by Surface Mechanical Grinding Treatment. *Materials Letters*, **166**, 59-62. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.12.025>
- [8] 赵云龙, 王涛, 杨志卿. 表面机械多重碾磨对 2024 铝合金力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(12): 1370-1374.
- [9] 张忠杰. 深冷处理对 Ti-6Al-4V 钛合金摩擦磨损行为及机理的影响[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [10] 左健民, 胡艳艳, 汪木兰, 费树岷, 顾雪艳. 基于 J-C 模型的 Ti6Al4V 切屑成形有限元模拟与分析[J]. 机床与液压, 2009, 37(11): 7-10, 40.
- [11] Lee, W.S. and Lin, C.F. (1998) High-Temperature Deformation Behaviour of Ti6Al4V Alloy Evaluated by High Strain-Rate Compression Tests. *Journal of Materials Processing Technology*, **75**, 127-136. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00302-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00302-6)
- [12] Chen, G., Ren, C., Yang, X., Jin, X. and Guo, T. (2011) Finite Element Simulation of High-Speed Machining of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Based on Ductile Failure Model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **56**, 1027-1038. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3233-6>
- [13] Estrin, Y., Tóth, L.S., Molinari, A. and Bréchet, Y. (1998) A Dislocation-Based Model for All Hardening Stages in Large Strain Deformation. *Acta Materialia*, **46**, 5509-5522. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00196-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00196-7)
- [14] Ding, H., Shen, N. and Shin, Y.C. (2011) Modeling of Grain Refinement in Aluminum and Copper Subjected to Cutting. *Computational Materials Science*, **50**, 3016-3025. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.05.020>
- [15] Ding, H. and Shin, Y.C. (2014) Dislocation Density-Based Grain Refinement Modeling of Orthogonal Cutting of Titanium. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **136**, Article No. 041003. <https://doi.org/10.1115/1.4027207>
- [16] [德]C·莱茵斯, M·皮特尔斯, 编. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [17] 丁利强. 铝合金切削表面位错密度和晶粒细化的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2013.