

## 表面质量控制及检测

## 基于热力耦合的单磨粒临界磨削仿真分析

吴书安, 祝锡晶, 郭策

(中北大学 机械与动力工程学院, 太原 030051)

**摘要:**目的 通过仿真研究磨削中单磨粒几何特征对切屑根部材料分离的影响, 得到脆-塑转变的临界磨削参数值。方法 针对 Ti6Al4V 合金, 通过对单磨粒划擦的分析, 建立热-力耦合平面仿真模型, 研究切屑根部有效流动应力随单磨粒刃圆半径和磨削深度的变化情况。结果 在磨粒刃口处, 刃圆半径  $r=0.1\ \mu\text{m}$  时, 磨削深度  $h\approx 0.02\ \mu\text{m}$ , 出现脆-塑转变的临界现象; 在  $h>0.3\ \mu\text{m}$  时, 可能会实现材料的塑性去除, 磨削热效应对其有促进作用。刃圆半径  $r=1\ \mu\text{m}$  时, 磨削深度  $h$  为  $0.2\sim 3\ \mu\text{m}$ , 有效流动应力的最小值为  $948.479\ \text{MPa}$ , 此时在磨粒刃口处几乎没有材料塑性流动的现象, 磨削热效应不明显。刃圆半径  $r=10\ \mu\text{m}$  时, 磨削深度  $h$  为  $2\sim 30\ \mu\text{m}$ , 有效流动应力的最小值为  $716.351\ \text{MPa}$ , 最大值为  $763.59\ \text{MPa}$ , 磨粒刃口处切屑以塑性流动方式产生, 磨削热对其有一定的促进作用。结论 仿真得出使切屑根部材料实现塑性流动的单磨粒刃圆半径、磨削深度阈值范围和脆-塑转变的临界值, 同时得到磨削热效应对切屑形成的作用效果。取刃圆半径为  $0.1\ \mu\text{m}$  或者  $10\ \mu\text{m}$  左右的磨粒, 适当增大磨削深度, 可实现切屑根部材料的塑性流动, 降低对磨粒的冲击作用, 并提高磨削效率。

**关键词:** 单磨粒; 刃圆半径; 磨削深度; 有效流动应力; 热效应; 临界磨削

**中图分类号:** TG356.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)08-0144-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.08.024

## Simulation Analysis of Critical Grinding of Single Grain Based on the Thermo-Mechanical Couple

WU Shu-an, ZHU Xi-jing, GUO Ce

(School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the effect of the single grain's geometric features for the material separation on cut root by simulation and get the critical grinding parameter values of brittle-ductile transition. **Methods** For the Ti6Al4V alloy, the thermal-force coupling plane simulation model was established through the analysis of single grain scratch to study the relationship of the effective flow stress along with the single grain edge radius and the grinding depth in the end of the cutting chip. **Results** On the grain's blade edge, the critical phenomenon of brittle-ductile transition appeared when edge radius  $r$  was  $0.1\ \mu\text{m}$  and

收稿日期: 2016-04-20; 修订日期: 2016-05-07

**Received:** 2016-04-20; **Revised:** 2016-05-07

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51275490); 中北大学研究生科技基金项目 (20151215)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(51275490) and the Science and Technology Foundation of Post Graduate of North University of China(20151215)

**作者简介:** 吴书安 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密与特种加工。

**Biography:** WU Shu-an (1990—), Male, Master, Research focus: precision and special processing.

grinding depth  $h$  was about  $0.02\ \mu\text{m}$ ; when  $h$  was  $>0.3\ \mu\text{m}$ , the material's plastic removal might be removed, which should be promoted by the grinding heat effect. When the radius of cutting edge  $r$  was  $1\ \mu\text{m}$  and the grinding depth was  $h$  was  $0.2 \sim 3\ \mu\text{m}$ , the minimum value of effective flow stress was  $948.479\ \text{MPa}$ . At this time, there was no material plastic flow at the grinding blade edge, and the grinding thermal effect was not obvious. When edge radius  $r$  was  $10\ \mu\text{m}$  and grinding depth  $h$  was about  $2 \sim 30\ \mu\text{m}$ , the minimum effective flow stress was  $716.351\ \text{MPa}$  and the maximum value  $763.59\ \text{MPa}$ , and the chips on blade edge were generated in plastic flow, which was promoted by the grinding heat effect. **Conclusion** The threshold range of plastic flow and the critical value of brittle-plastic transition are got in simulation process, and the effect of the grinding thermal effect on the formation of the chip is also obtained. Use of grains with edge radius of  $0.1\ \mu\text{m}$  or about  $10\ \mu\text{m}$  and proper increase of grinding depth can realize the plastic flow of the material, reduce the impact on the grain and improve the grinding efficiency.

**KEY WORDS:** single grain; edge radius; grinding depth; effective flow stress; heat effect; critical grind

磨削加工是精密加工中一种重要的方法。在磨削加工的仿真研究中, 单磨粒磨削作为砂轮磨削的一种简化形式, 近年来受到越来越多学者的重视<sup>[1-2]</sup>。SU 等<sup>[3]</sup>采用自适应网格划分技术, 建立了一种粒尖为四棱锥切刃的单磨粒磨削模型。张明等<sup>[4]</sup>使用 Deform-2D 软件建立单磨粒磨削平面仿真模型, 分析了磨粒前角与磨削力和工件表面温度之间的关系。在磨削中, 材料的塑性去除能实现工件表面更低粗糙度和更好表面质量的要求<sup>[5]</sup>。BIFANO 等<sup>[6]</sup>最早研究磨削过程的塑性加工临界条件, 认为当磨粒切削深度小于其临界磨削深度时, 可以实现脆性材料的塑性去除。言兰等<sup>[7]</sup>通过数值仿真研究不同工艺参数下单磨粒耕犁和磨削的临界磨削转变过程, 得到不同切削速度下的临界转变切削深度。磨削时由工件与磨粒接触面摩擦产生的热量会对磨削过程有一定的影响<sup>[8]</sup>。HUO 等<sup>[9]</sup>对单磨粒实现硅材料的脆-塑转变做了一定的研究, 并分析了磨削热对磨削过程的影响。

Ti6Al4V 合金具有比强度高和疲劳强度高良好性能, 在航空航天发动机和医疗器械等方面得到广泛应用。在这些应用场合, 迫切需要运用更高表面质量和更低粗糙度的零部件。目前, 尚未见针对 Ti6Al4V 合金材料受磨粒刃圆半径和磨削深度共同作用下实现临界磨削的研究。本文基于热力耦合模型, 针对单磨粒的不同刃圆半径和磨削深度, 对单磨粒实现材料的临界磨削进行仿真研究。

## 1 仿真模型的建立

### 1.1 正交微磨削过程仿真

考虑磨粒整体形状的不规则性<sup>[10]</sup>, 将磨粒顶尖

简化成圆锥角为  $2\theta$  的圆锥体。磨削时, 磨粒顶尖会被部分磨损。将其等效为带有刃圆半径为  $r$  的圆锥体, 磨削深度为  $h$ , 如图 1 所示。

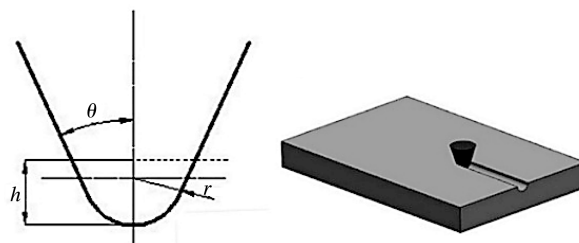


图 1 单磨粒磨削原理图

Fig.1 Grinding principle picture of a single grain

在磨削过程中, 磨粒的圆锥角为  $30^\circ$ 。磨粒采用刚体模型并划分三角形网格单元, 网格划分如图 2a 所示。刃圆半径  $r=0.1\ \mu\text{m}$  和  $1\ \mu\text{m}$  时, 工件的几何尺寸为  $34\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ , 圆弧段半径为  $6\ \mu\text{m}$ ; 刃圆半径  $r=10\ \mu\text{m}$  时, 工件的几何尺寸为  $340\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ , 圆弧段半径为  $60\ \mu\text{m}$ 。对工件划分四边形网格单元, 网格划分如图 2b 所示。工件模型的上边和

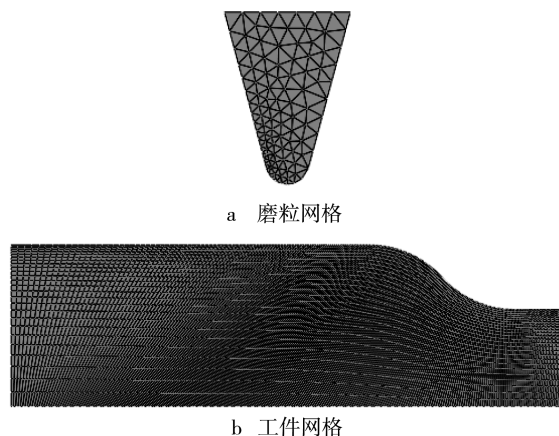


图 2 磨粒与工件的有限元网格划分

Fig.2 Finite element mesh of abrasive grain and workpiece: a) the mesh of abrasive grain, b) the mesh of workpiece

左右两边均采用密度偏离撒种,得到网格总单元数为 4925,总结点数为 5148。

微切削中,许多研究者用实验证明:当材料变形尺寸减小到一定值时,有效流动应力发生显著尺度效应的现象。运用应变梯度塑性理论建立的工件材料本构模型,能成功模拟该实验现象。

考虑磨削时磨粒与工件接触表面的热传递,设置传热系数为 0.9<sup>[11]</sup>。建立热-力耦合的正交微磨削有限元模型,假设条件为<sup>[12]</sup>:磨粒的磨削瞬间被视为平面切削过程;磨削过程为稳态切削;磨削温度不足以使材料有金相组织等变化;刀具被约束为刚体。

基于应变梯度塑性理论的材料有效流动应力计算公式为<sup>[12]</sup>:

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, \eta) = \sigma_{JC} \sqrt{1 + \frac{18\alpha_C^2 G^2 b \eta}{\sigma_{JC}^2}} =$$

$$(A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}))(1 - T^m)(1 + \frac{18\alpha_C^2 G^2 b \eta}{\sigma_{JC}^2})^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $m$ 、 $n$ 、 $\alpha_C$  为材料系数,其中<sup>[13]</sup> $C=0.014$ ,  $m=0.466$ ,  $n=0.71$ ;  $G$  为剪切模量;  $b$  为伯格常数;  $\varepsilon$ 、 $\dot{\varepsilon}$  分别为有效应变和有效应变率;  $\eta$  为有效应变梯度;  $\sigma_{JC}$  为用 Johnson-Cook 模型计算的有效流动应力;  $T$  为量纲温度项。

运用 ABAQUS/Explicit 有限元软件对正交微磨削过程进行仿真。约束工件其余三条边  $x$  和  $y$  方向的位移自由度。给刀具设定一参考点,并添加运动速度约束,数值大小为 60 m/min。微磨削摩擦模型采用罚函数摩擦模型,摩擦因数为 0.5。工件和磨粒材料参数如表 1 所示<sup>[14]</sup>。

表 1 工件和磨粒材料参数  
Table 1 Material parameters of workpiece and grain

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	质量热容 /(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	热导率 /(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	熔点 /℃	强度极限 /MPa	屈服极限 /MPa
工件	113.8	0.342	4430	526.3	7.3	1668	923.2	673.54
磨粒(圆锥角 30°)	800	0.2	15000	203	46			

## 1.2 条件模型的建立

材料在有效流动应力达到屈服极限之前发生弹性变形,无切屑产生;有效流动应力超过材料强度极限时开始有微裂纹产生,并发生塑-脆转变。因此,针对 Ti6Al4V 合金材料塑性去除的条件模型为:  $\sigma \leq \delta_0 \sigma_{s0}$ , 不产生切屑;  $\delta_0 \sigma_{s0} < \sigma \leq \delta_1 \sigma_{sm}$ , 塑性去除阶段;  $\delta_1 \sigma_{sm} < \sigma$ , 脆性去除阶段。其中,  $\delta_0$  为单磨粒磨削时塑性域系数,  $\delta_1$  为单磨粒磨削时脆性域系数<sup>[15]</sup>。具体确定均需要进行大量实验数据分析统计。

## 2 结果分析

针对单元编号 2476 的有效流动应力和其右上角的节点编号 2601 的磨削温度,分析这两个变量受磨粒刃圆半径和磨削深度的影响。单磨粒磨削仿真模型图(图 3)中,有效流动应力沿磨粒头周向分布,同一圆弧线上数值相同;离磨粒头部圆弧面越远,工件的有效流动应力越小。这验证了吴继华等<sup>[12]</sup>所得的结论。

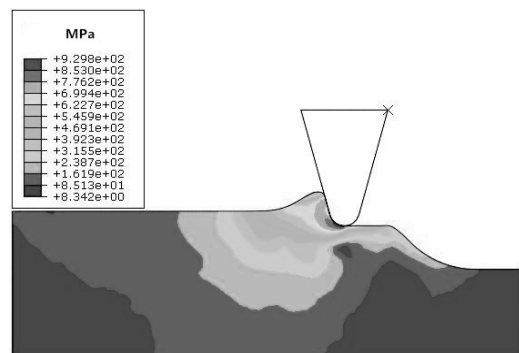


图 3 单磨粒磨削仿真模型

Fig.3 Simulating model of single grain grinding

改变单磨粒磨削深度  $h$  与刃圆半径  $r$  的数值大小,仿真结果如图 4 所示。图 4a、b、c 为相同刃圆半径下不同磨削深度对磨削的影响;图 4c、d 为相同磨削深度下不同刃圆半径对磨削的影响。

针对磨削时的临界脆-塑转变现象和热效应,具体从以下三种条件分析切屑根部所取单元和节点的有效流动应力最大值( $\sigma_{max}$ )及磨削温度最大值( $T_{max}$ )的变化情况。

1)  $r=0.1 \mu\text{m}$ 。  $h$  取 6 组数值,仿真得出  $\sigma_{max}$  和  $T_{max}$ ,如表 2 所示。绘制折线图,如图 5 所示,

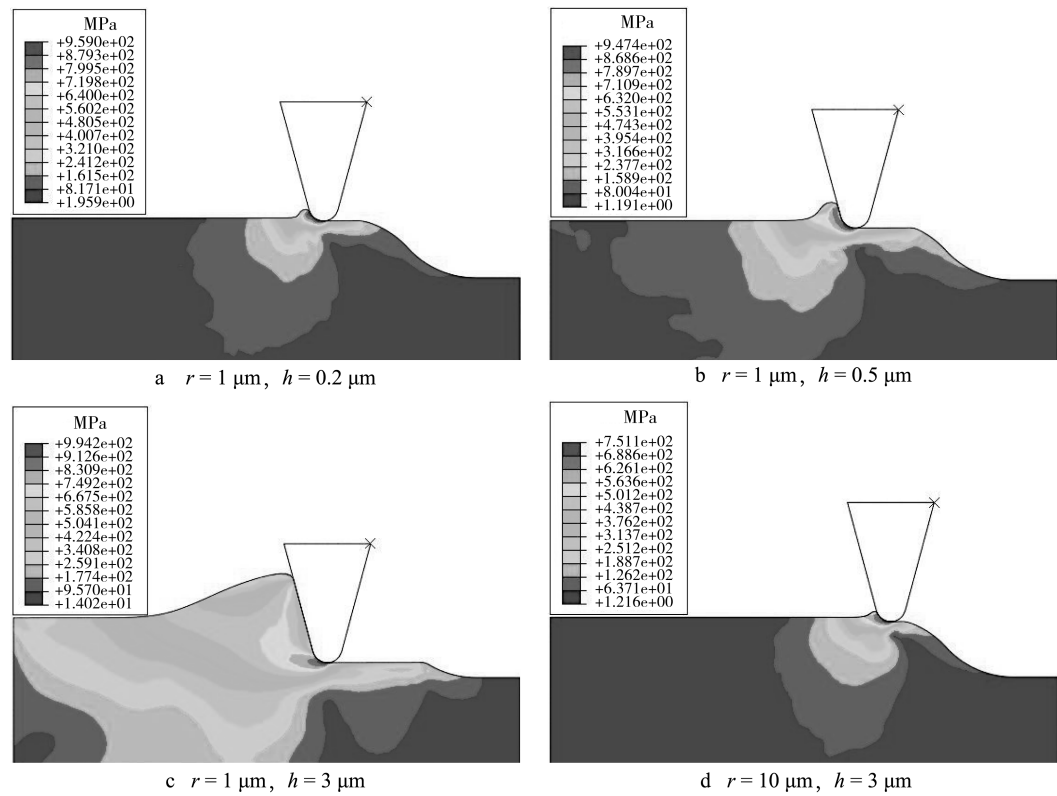


图 4 不同参数的单磨粒磨削仿真模型  
Fig.4 Simulating model of single grain grinding at different parameters

表 2 各变量值 ( $r=0.1 \mu\text{m}$ )  
Table 2 Value of each variables ( $r=0.1 \mu\text{m}$ )

序号	$h/\mu\text{m}$	$\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	$T_{\text{max}}/\text{K}$
1	0.02	894.471	822.183
2	0.03	963.376	843.534
3	0.05	943.198	852.589
4	0.1	995.374	870.699
5	0.15	1002.16	892.127
6	0.3	953.296	922.139

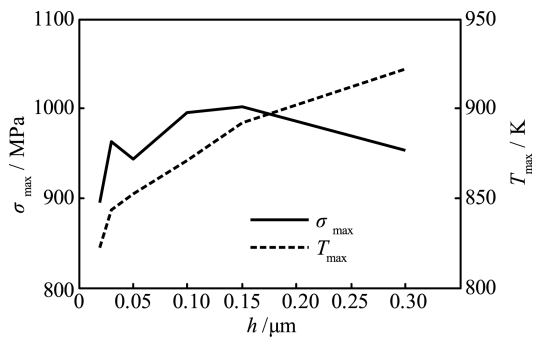


图 5 磨削深度对  $\sigma_{\text{max}}$  和  $T_{\text{max}}$  的影响 ( $r=0.1 \mu\text{m}$ )  
Fig.5 Influence of grinding depth for  $\sigma_{\text{max}}$  and  $T_{\text{max}}$  ( $r=0.1 \mu\text{m}$ )

$\sigma_{\text{max}}$  先增大后减小。拟合可得，当  $h \approx 0.17 \mu\text{m}$  时， $\sigma_{\text{max}}$  达到最大值，为 1009.53 MPa，并出现了尺度

效应所体现的“越小越强”现象。 $T_{\text{max}}$  随着  $h$  增大而近似呈线性增大。参考条件模型可得：工件材料基本处于脆性分裂阶段。由表 1 可知，Ti6Al4V 合金的强度极限  $\sigma_{\text{sm}}=923.2 \text{ MPa}$ 。拟合可得，在  $r=0.025 \mu\text{m}$  时，实际塑性去除的有效流动应力数值可能大于塑-脆转变的临界值  $\delta_1 \sigma_{\text{sm}}$ 。当  $h \approx 0.17 \mu\text{m}$  时，磨削热的热软化效应开始对切屑根部材料的有效流动应力产生主要影响。这是由于磨削温度超过了 Ti6Al4V 合金的动态重结晶温度<sup>[14]</sup>，此时材料内部发生晶粒位错的重新排布，阻碍切屑根部局部塑性变形的阻力下降，出现应力软化现象。继续增大  $h$ ，由数据拟合可知，当  $h$  超过  $0.33 \mu\text{m}$  时，流动应力数值可能小于塑-脆转变的临界值  $\delta_1 \sigma_{\text{sm}}$ ，从而实现材料的脆-塑性临界转变。

2)  $r=1 \mu\text{m}$ 。 $h$  取 6 组数值，仿真得出  $\sigma_{\text{max}}$  和  $T_{\text{max}}$ ，如表 3 所示。绘制折线图，如图 6 所示。拟合可得，当  $h \approx 0.5 \mu\text{m}$  时， $\sigma_{\text{max}}$  有最小值，为 948.479 MPa；继续增大  $h$ ，当  $h \approx 2.6 \mu\text{m}$  时， $\sigma_{\text{max}}$  取得最大值，为 998.176 MPa。热软化效应对  $\sigma_{\text{max}}$  的影响不明显。参考条件模型可得：切屑基本处于脆性分裂阶段，这将引起工件表面锯齿状的形成，增加磨削过程对磨粒的震荡冲击，不利于工件表面质量的提

高, 并会降低磨粒的使用寿命。

3)  $r=10\text{ }\mu\text{m}$ 。  $h$  取 6 组数值, 仿真得出  $\sigma_{\max}$  和  $T_{\max}$ , 如表 4 所示。绘制折线图, 如图 7 所示。 $\sigma_{\max}$

表 3 各变量值 ( $r=1\text{ }\mu\text{m}$ )  
Table 3 Value of each variables ( $r=1\text{ }\mu\text{m}$ )

序号	$h/\mu\text{m}$	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$T_{\max}/\text{K}$
1	0.2	961.674	854.543
2	0.3	932.687	901.894
3	0.5	949.825	875.481
4	1	957.175	886.291
5	1.5	967.875	889.165
6	3	993.791	911.104

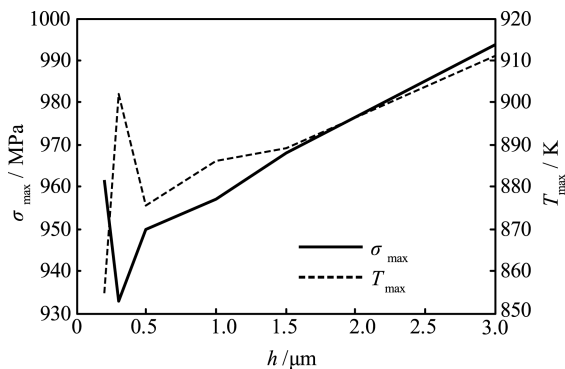


图 6 磨削深度对  $\sigma_{\max}$  和  $T_{\max}$  的影响 ( $r=1\text{ }\mu\text{m}$ )  
Fig.6 Influence of grinding depth for  $\sigma_{\max}$  and  $T_{\max}$  ( $r=1\text{ }\mu\text{m}$ )

表 4 各变量值 ( $r=10\text{ }\mu\text{m}$ )  
Table 4 Value of each variables ( $r=10\text{ }\mu\text{m}$ )

序号	$h/\mu\text{m}$	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$T_{\max}/\text{K}$
1	2	763.59	1000
2	3	746.168	1017.86
3	5	742.003	1034.91
4	10	728.464	1050.42
5	15	723.633	1072.59
6	30	720.352	1120.56

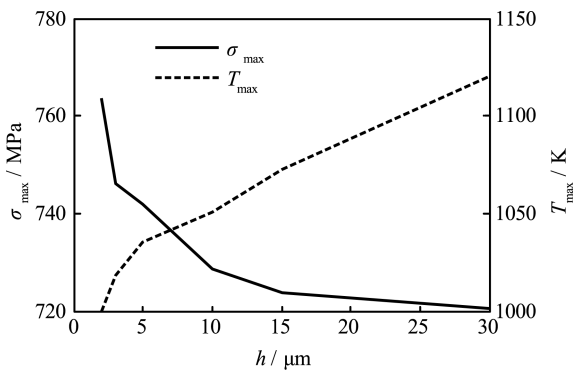


图 7 磨削深度对  $\sigma_{\max}$  和  $T_{\max}$  的影响 ( $r=10\text{ }\mu\text{m}$ )  
Fig.7 Influence of grinding depth for  $\sigma_{\max}$  and  $T_{\max}$  ( $r=0.1\text{ }\mu\text{m}$ )

随着  $h$  的增大, 先快速降低再减缓, 继续增大  $h$  会出现最小值。在  $h$  范围内, 最小有效流动应力为 720.352 MPa, 最大为 763.59 MPa。而  $T_{\max}$  继续增大, 当超过 Ti6Al4V 合金的动态再结晶温度后, 晶粒位错重排, 出现的热软化效应促进  $\sigma_{\max}$  的进一步降低。参考条件模型可得: 切屑的形成均处于塑性流动阶段, 这有利于减少磨粒的磨损。

对比可知,  $r$  对  $\sigma_{\max}$  的影响也会出现“越小越强”的现象。当  $r$  为  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  时, 改变  $h$ , 会出现脆-塑性去除的临界转变值。当  $r$  为  $10\text{ }\mu\text{m}$  时, 塑性去除的阈值范围较宽。而  $r$  为  $1\text{ }\mu\text{m}$  时, 所研究  $h$  范围几乎没有塑性去除的临界值出现。对比表 3 和表 4 最后一组数据可知,  $r$  增大也会强化磨削热的产生。磨削 Ti6Al4V 合金时, 应尽量避免使用  $r\approx 1\text{ }\mu\text{m}$  的磨粒; 当  $r\approx 0.1\text{ }\mu\text{m}$  时, 增加  $h$ , 有利于高质量的表面形成; 选用  $r\approx 10\text{ }\mu\text{m}$  时, 可参考文中  $h$  的数据, 适当增加  $h$  可以提升磨削效率。对比图 6 和图 7 可知,  $r$  尺寸取  $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$  范围, 磨粒刃圆半径对工件材料实现脆、塑性切削的影响比磨削深度的影响更大。

### 3 结论

1) 基于应变梯度塑性理论的 J-C 材料本构模型, 建立了考虑单磨粒刃圆半径、磨削深度的切屑根部有效流动应力的热-力耦合有限元分析模型。用该模型验证了工件材料在微磨削时的尺度效应现象。

2) 针对 Ti6Al4V 合金材料, 当刃圆半径为  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  时, 适当调整磨削深度, 磨削过程可能出现脆-塑临界转变, 进入塑性去除阶段。当磨削深度为  $0.17\text{ }\mu\text{m}$  时, 磨削热的热软化效应开始对切屑根部材料的有效流动应力产生主要影响。当刃圆半径为  $1\text{ }\mu\text{m}$  时, 几乎不出现材料塑性流动的现象, 磨削时应注意避免。当刃圆半径为  $10\text{ }\mu\text{m}$  时, 磨削均处于条件模型中的塑性去除阶段, 其塑性去除域的范围较宽, 未出现临界磨削现象, 可继续增加磨削深度以提高效率。

3) 在微磨削下, 磨粒刃圆半径与磨削深度对材料切屑的形成有重要影响, 但并非尺寸越小越好。当  $r$  为  $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$  时, 磨粒刃圆半径对工件材料脆、塑性磨削的影响比磨削深度的影响更大。

## 参考文献

- [1] BARGE M, RECH J, HAMDI H, et al. Experimental Study of Abrasive Process[J]. *Wear*, 2008, 264: 382—388.
- [2] 王艳, 王帅, 刘建国, 等. 基于 SPH 方法单颗粒磨粒磨削 TC4 动态过程模拟研究[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(11): 2865—2872.  
WANG Yan, WANG Shuai, LIU Jian-guo, et al. Dynamic Simulation of Single Abrasive Grain Cutting TC4 Based on SPH Method[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(11): 2865—2872.
- [3] SU Chong, HOU Jun-ming, ZHU Li-da, et al. Simulation Study of Single Grain Cutting Based on Fluid-Solid-Interaction Method[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(19): 5250—5253.
- [4] 张明, 傅蔡安. 基于 Deform-2D 的单颗磨粒磨削过程的有限元分析[J]. *工具技术*, 2010, 44(10): 38—43.  
ZHANG Ming, FU Cai-an. Finite Element Analysis of Single Abrasive Grain Grinding Based on Deform-2D[J]. *Tool Engineering*, 2010, 44(10): 38—43.
- [5] MALKIN S. Grinding Technology Theory and Applications of Machining with Abrasives[M]. New York: Industrial Press Inc, 2008.
- [6] BIFANO T G, DOW T A, SCATTERGOOD R O. Ductile-Regime Grinding: A New Technology for Machining Brittle Materials[J]. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1991, 11(3): 184—189.
- [7] 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): 172—182.  
YAN Lan, JIANG Feng, RONG Yi-ming. Grinding Mechanism Based on Single Grain Cutting Simulation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(11): 172—182.
- [8] BRINKSMEIER E, AURICH J C, GOVEKAR E, et al. Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2006, 55(2): 667—696.
- [9] HUO F W, JIN Z J, KANG R K, et al. Experimental Investigation of Brittle to Ductile Transition of Single Crystal Silicon by Single Grain Grinding [J]. *Key Engineering Material*, 2007, 329: 433—438.
- [10] 郑华林, 张伟. 超声振动磨削表面残余应力数值模拟研究[J]. *表面技术*, 2015, 44(7): 131—136.  
ZHENG Hua-lin, ZHANG Wei. Simulation Research on the Surface Residual Stress of Ultrasonic Vibration Honing [J]. *Surface Technology*, 2015, 44(7): 131—136.
- [11] UMBRELLO D. Finite Element Simulation of Conventional and High Speed Machining of Ti6Al4V Alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 196(1—3): 79—87.
- [12] 吴继华, 王文奎, 刘战强. 基于应变梯度塑性理论的微切削第一变形区应变分布研究[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(15): 1797—1801.  
WU Ji-hua, WANG Wen-kui, LIU Zhan-qiang. Deformation Mechanism in Primary Deformation Zone during Micro-cutting Processes[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(15): 1797—1801.
- [13] GAVRUS A, CAESTECKER P, RAGNEAU E, et al. Analysis of the Dynamic SHPB Test Using the Finite Element Simulation [J]. *Journal de Physique IV*, 2003, 110(1): 353—358.
- [14] 刘丽娟, 吕明, 武文革, 等. Ti6Al4V 合金的修正本构模型及其有限元仿真[J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(7): 73—79.  
LIU Li-juan, LYU Ming, WU Wen-ge. An Improved Constitutive Model and Finite Element Simulation for Machining Ti6Al4V Alloy[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(7): 73—79.
- [15] 程军, 巩亚东, 阎旭强, 等. 硬脆材料微磨削延性域复合临界条件建模及试验研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(23): 191—198.  
CHENG Jun, GONG Ya-dong, YAN Xu-qiang. Modeling and Experimental Study of Complex Critical Condition for Ductile-regime Micro-grinding of Hard Brittle Material[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(23): 191—198.